

Monitoreo de las obras piloto de recarga artificial en el acuífero Morroa, departamento de Sucre, Colombia

José Luis Navarro Mercado



Departamento de Ciencias de la Tierra

Universidad EAFIT

Medellín

2020

Monitoreo de las obras piloto de recarga artificial en el acuífero Morroa, departamento de
Sucre, Colombia

José Luis Navarro Mercado

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Geólogo

Asesor: Marcela Jaramillo Uribe (PhD)

Coasesor: Héctor Mario Herrera Parra (Esp)



Departamento de Ciencias de la Tierra

Universidad EAFIT

Medellín

2020

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Medellín, mayo de 2020

Dedicatoria

A Dios, por guiarme en este camino y brindarme la sabiduría para obtener este título.

A mi madre, por ser mi motor de vida. A mi padre, por su apoyo, enseñanzas y consejos. A mis hermanas por su acompañamiento y apoyo incondicional. Sin ustedes esto no sería una realidad.

A familiares y amigos por el apoyo brindado.

Agradecimientos

A Marcela Jaramillo Uribe, asesora de este trabajo, por sus conocimientos, por sus consejos, por su tiempo y compromiso para realizar este proyecto.

A Héctor Mario Herrera Parra, en calidad de Coasesor, por sus enseñanzas brindadas en la práctica profesional y su acompañamiento.

A todo el personal de la oficina de aguas de CARSUCRE, por todos los conocimientos transmitidos y momentos vividos.

A CARSUCRE, por abrirme las puertas en la realización de mi práctica profesional y por brindarme la información necesaria para que este proyecto fuera una realidad.

A mis grandes amigos Juan José, Mateo, Santiago, Sebastián, Yeiner, Camilo, Karina, Juanita, Alexa, Tulio, por regalarme los mejores momentos.

A los docentes Marco Fidel Gamboa, Oscar Geovanny Bedoya, María Isabel Marín y a la docente jubilada Gloria María Sierra, por sus enseñanzas, apoyo y por ser parte de este proceso.

A José Fernando Duque, docente, por su apoyo y sus consejos en un momento crucial de la carrera.

A Alexandra Lora y Nicolás Montoya, amigos, por compartir su tiempo y sus conocimientos.

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	16
1. GENERALIDADES	22
1.1 Preguntas de investigación.....	22
1.2 Hipótesis.....	22
1.3 Objetivo general	22
1.4 Objetivos específicos.....	22
2. METODOLOGÍA.....	23
2.1 Etapa de consulta bibliográfica.....	23
2.2 Análisis y procesamiento de datos	25
2.2.1 Eficiencia de obras piloto de recarga artificial	25
2.2.2 Caudal infiltrado total por las obras piloto de recarga artificial.....	28
2.2.3 Niveles piezométricos	28
2.2.4 Estación agroclimática El Tesoro	29
3. ZONA DE ESTUDIO.....	31
3.1 Localización.....	31
3.2 Hidrografía	32
3.3 Clima	33
4 MARCO GEOLÓGICO.....	34
5 MARCO HIDROGEOLÓGICO	36
5.1 Definiciones.....	36
5.2 Sistemas Acuíferos.....	37
5.2.1 Acuífero Morroa.....	39
6 Obras de Recarga Artificial	44
6.1 Descripción general y funcionamiento de las obras.	44
7 RESULTADOS	49
7.1 Eficiencia obras de recarga artificial	49
7.2 Caudal total infiltrado por las obras de recarga artificial	52
7.2.1 Laguna de infiltración.....	52
7.2.2 Pozo de gran diámetro y trincheras de infiltración	53
7.3 Precipitación	54
7.4 Evapotranspiración	54
7.4.1 Evapotranspiración potencial (ETP)	54
7.4.2 Evapotranspiración real (ETR)	55

7.5	Piezómetros.....	58
8	DISCUSIÓN.....	60
9	CONCLUSIONES.....	70
10	BIBLIOGRAFÍA	72

Lista de Figuras

Figura 1.	Mapa localización acuífero de Morroa dentro de su provincia hidrogeológica ..	18
Figura 2.	Puntos de captación en el acuífero Morroa	19
Figura 3.	Porcentajes de pozos legales e ilegales en el acuífero Morroa	20
Figura 4.	Variación de la profundidad de los pozos en el acuífero Morroa a lo largo de las décadas	21
Figura 5.	Flujograma metodológico.....	24
Figura 6.	Mapa de localización de la zona de estudio	32
Figura 7.	Mapa de corrientes superficiales.....	33
Figura 8.	Precipitación promedio multianual	34
Figura 9.	Mapa geológico de la zona de estudio.	35
Figura 10.	Corte regional esquemático de las formaciones que afloran en la zona de estudio	35
Figura 11.	Mapa de provincia hidrogeológicas de Colombia	38
Figura 12.	Sistemas acuíferos, jurisdicción CARSUCRE.	39
Figura 13.	Mapa acuífero Morroa.....	40
Figura 14.	Mapa unidades hidrogeológicas de la zona de estudio	41
Figura 15.	Bloque Diagrama esquemático de los niveles de la U.H.3	42
Figura 16.	Plano esquemático del sistema de obras piloto de recarga artificial en el predio el Tesoro.....	45
Figura 17.	Plano y fotografía del muro de contención.	46
Figura 18.	Plano y fotografía de la laguna de sedimentación.	46
Figura 19.	Plano y fotografía de la Trinchera de infiltración 1.....	47
Figura 20.	Planos y fotografía del Pozo de gran diámetro.....	48
Figura 21.	Planos y fotografía de la laguna de infiltración.	47
Figura 22.	Planos de la trinchera de infiltración 2.....	49
Figura 23.	Eficiencia obras piloto de recarga artificial, velocidad de infiltración.....	50
Figura 24.	Eficiencia obras piloto de recarga artificial, caudal de infiltración.	51

Figura 25. Caudal total acumulado de infiltración para los años analizados, en la laguna de infiltración.	52
Figura 26 .Caudal total acumulado de infiltración para los años analizados, en el pozo de gran diámetro y las trincheras de infiltración 1 y 2.	53
Figura 27. Precipitación promedio multianual para los años 2008-2018	54
Figura 28. Evapotranspiración potencial (ETP) promedio multianual para los años 2008-2018	55
Figura 29. Evapotranspiración real (ETR) promedio multianual para los años 2008-2018.	56
Figura 30. Relación entre la evapotranspiración potencial (ETP), evapotranspiración real (ETR) y la precipitación promedios multianuales para los años 2008-2018	56
Figura 31. Variación temporal de niveles estáticos del piezómetro 44-IV-D-PZ-02 Predio El Tesoro.	58
Figura 32 .Variación temporal de niveles estáticos del piezómetro 44-IV-D-PZ-04 Predio El Tesoro.	59
Figura 33. Comportamiento de la precipitación anual para el periodo de tiempo 2008-2018	61
Figura 34. Relación entre la evapotranspiración potencial (ETP), evapotranspiración real (ETR) y la precipitación acumulativa anual para los años 2008-2018	62
Figura 35. Relación entre la evapotranspiración real (ETR), la precipitación (P) y los caudales infiltrados totales para los años 2008-2018.....	65
Figura 36. Relación entre la evapotranspiración real (ETR), la precipitación (P) y la columna de agua infiltrada por las obras de recarga artificial para los años 2008-2018	67

Lista de Tablas

Tabla 1. Áreas de almacenamiento obras de recarga artificial (ORA).	25
Tabla 2. Número de días del mes.	30
Tabla 3. Número de horas de sol.	30
Tabla 4. Características de las unidades geológicas.....	36
Tabla 5. Características generales del acuífero Morroa.	40
Tabla 6.Características de las unidades hidrogeológicas.....	41
Tabla 7.Niveles de acuíferos de la unidad hidrogeológica 3 (U.H.3)	42
Tabla 8. Características de los niveles de acuíferos de U.H.3	42

Tabla 9. Caudales totales infiltrados por el pozo de gran diámetro en el periodo 2008-2018	53
Tabla 10. Caudales totales infiltrados por el pozo de gran diámetro en el periodo 2008-2018	57

Lista de Anexos

- Anexo 1. ORA: Eficiencia en formato Excel
- Anexo 2 .ORA: Caudales totales infiltrados en formato Excel
- Anexo 3. Precipitación en formato Excel
- Anexo 4. Evapotranspiración en formato Excel
- Anexo 5. Piezómetros en formato Excel
- Anexo 6. Graficas discusión en formato Excel
- Anexo 7. Mapas en formato PDF

INTRODUCCIÓN

Si existe un componente vital, característico y que define a nuestro planeta, es el agua. Utilizada como base en la búsqueda de organismos vivos en otros planetas del sistema solar, el agua es la sustancia fundamental para la vida en la Tierra. (Pace, 2001).

El agua está ligada a todos los organismos biológicos, en todos los biomas imaginables. Incluso las formas de vida más exóticas a 11,000 metros de profundidad en el mar y aquellas sobreviviendo bajo los cascos polares de los volcanes en la Antártida, la encuentran esencial. (Kaufman, 2013).

Pasa igual con los seres humanos; no somos la excepción a esta regla y necesitamos este recurso, bajo unos parámetros de calidad, de manera esencial para poder vivir. Es por esta razón, que su correcta administración se vuelve primordial y una obligación de todos los seres humanos que habitamos nuestro planeta.

Se estima que el volumen de agua contenido en la hidrosfera es de 1.386 millones de km (Christophenson, 1997). De este volumen el 97.5% se encuentra en los océanos como agua salada y no es utilizable para el consumo humano y el 2.5% restante, como agua dulce proveniente de los continentes. De este último porcentaje, el 68.7% se encuentra en forma sólida en los glaciares y el 30.1% como agua subterránea, quedando solamente el 0.8% que conforma los ríos y los cuerpos de agua (WWAP, 2006).

De esta manera el agua subterránea se define como la reserva primaria de agua dulce disponible para uso humano (Lin et al., 2019). Esta actúa como un depósito subterráneo para cuerpos de aguas superficiales, como humedales, lagos y ríos; atiende las necesidades de más de 2 mil millones de personas para agua potable y riego; y tiene una menor susceptibilidad a procesos de contaminación y degradación en comparación con las fuentes superficiales (Alley et al., 2002). De ahí la importancia de conocer su ocurrencia, distribución y principales características

hidráulicas, hidrológicas e hidrogeoquímicas para una gestión adecuada y sostenible del recurso en los sistemas acuíferos de nuestro planeta.

La ubicación geográfica, la variación topográfica y geológica y el régimen climático que caracterizan al territorio colombiano hacen de Colombia un país muy rico en oferta hídrica en el planeta. Sin embargo, esta oferta hídrica no está distribuida de manera homogénea en todas las regiones del país y, a su vez, está sometida a fuertes variaciones que determinan la disponibilidad del recurso hídrico; evidenciándose en zonas con un déficit importante de agua y otras zonas con grandes excedentes dentro del territorio colombiano. Esta riqueza hídrica se manifiesta en una extensa red fluvial superficial que cubre el país, en la existencia de cuerpos de aguas lenticos, enormes humedales y sistemas de agua subterránea, todos ellos interconectados y relacionados entre sí y con un factor determinante como lo es la geología (IDEAM, 2010).

Los sistemas de agua subterránea en Colombia han sido definidos con base en una clasificación realizada por el IDEAM. El país se divide en dieciséis provincias hidrogeológicas (IDEAM, 2010) las cuales fueron definidas con base en los límites de las cuencas sedimentarias del país (Barreto et al, 2007). Estas provincias, a su vez, fueron subdivididos en sesenta y un sistemas acuíferos en todo el territorio colombiano (IDEAM, 2015).

Estas dos definiciones hechas por el IDEAM, han sido muy importantes para el estudio y la caracterización de estos depósitos en todo el territorio nacional. Sin embargo, en algunos departamentos donde el recurso hídrico superficial es suficiente han dejado en segundo plano la extracción del agua subterránea, a diferencia de departamentos donde solo se cuenta con el abastecimiento de agua subterránea para abarcar la necesidad de ciudades enteras, como es el caso del departamento de Sucre.

El departamento de Sucre, en la jurisdicción de CARSUCRE (Corporación Autónoma Regional de Sucre), no cuenta con corrientes de agua superficiales que suplan la demanda de agua que tiene el departamento, razón por la cual depende exclusivamente de la extracción de agua subterránea. El área superficial de este

departamento se ubica dentro de la provincia hidrogeológica Sinú-San Jacinto (PC1), para la cual el IDEAM definió doce sistemas acuíferos, entre los que se encuentran los acuíferos Golfo de Morrosquillo (SAC 1.2), Toluviejo (SAC 1.10) y Morroa (SAC 1.1), entre los principales, siendo este último en el cual se hará énfasis en este trabajo (figura 1).

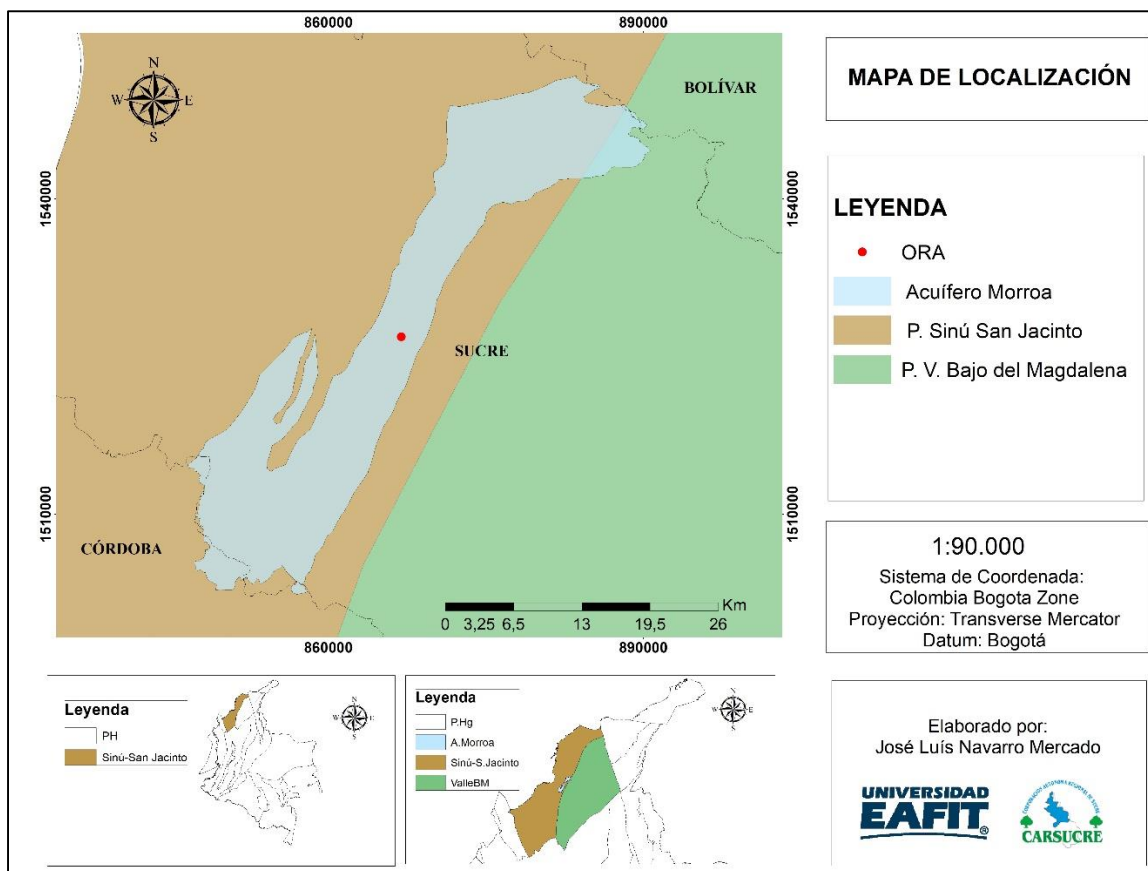


Figura 1. Mapa localización acuífero de Morroa dentro de su provincia hidrogeológica. Elaboración propia.

El acuífero Morroa está ubicado en la parte central del departamento de Sucre, tiene un área superficial de 645 km^2 y se define como un acuífero tipo confinado a semiconfinado (IDEAM, 2015). Sus condiciones hidrogeológicas, sus niveles acuíferos y las condiciones químicas de sus aguas hacen de este el de mayor importancia en el departamento, surtiendo de agua a más de quinientos mil (500.000) habitantes de las zonas urbanas y rurales de los municipios de Ovejas, Los Palmitos, Morroa, Corozal, San Juan de Betulia, Sincelejo y Sampues. Cabe destacar que el acuífero se abastece de las precipitaciones que se dan en la zona,

la precipitación media anual es de 1164.3 mm, sin embargo, hay un factor que condiciona el régimen de infiltración, la evapotranspiración.

Actualmente, según el Sistema de información y gestión de aguas subterráneas de Carsucre (SIGAS), se encuentran identificados un total de 278 puntos de captación dentro del acuífero, de los cuales 154 (55%) son pozos profundos, 85 (31%) son pozos artesanos, 20 (7%) son piezómetros, 14 (5%) son pozos de observación y 5 (2%) son manantiales. El mayor uso de éstos es el uso humano y doméstico y presentan un caudal de explotación de 1386 l/s (figura 2).

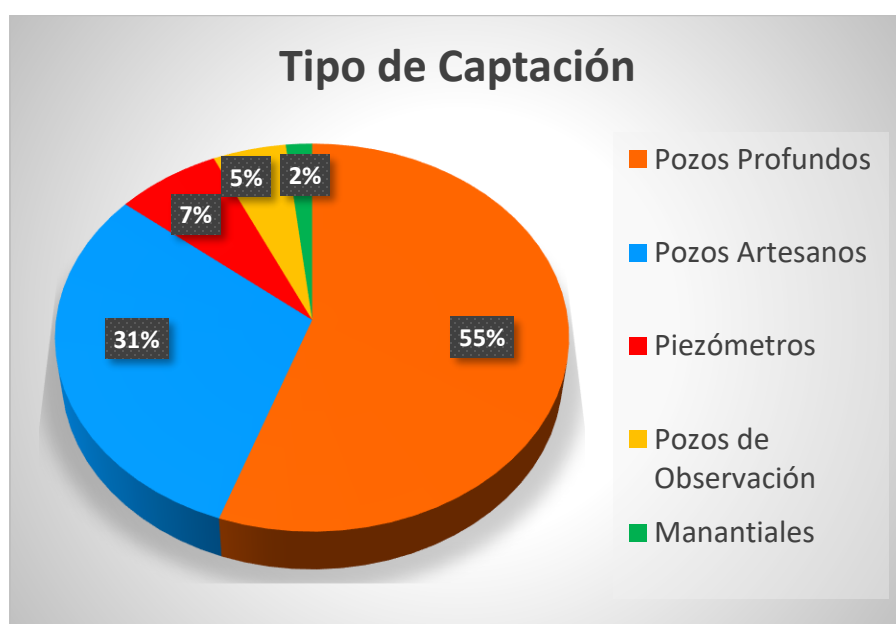


Figura 2. Puntos de captación en el acuífero Morroa. Datos tomados del Sistema de información y gestión de aguas subterráneas de Carsucre (SIGAS).

Sin embargo, el mal uso del agua del acuífero Morroa se ha convertido en una gran problemática para este; según el Sistema de información y gestión de aguas subterráneas de Carsucre (SIGAS) el 68% de los pozos profundos activos se encuentran ilegales (figura 3), lo que conlleva a una explotación indiscriminada del recurso y a un manejo no planificado del acuífero.

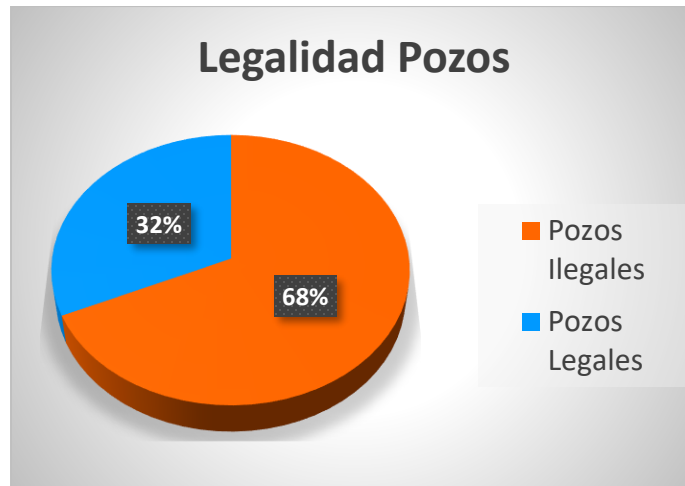


Figura 3. Porcentajes de pozos profundos activos legales e ilegales en el acuífero Morroa. Datos tomados del Sistema de información y gestión de aguas subterráneas de Carsucre (SIGAS).

Otras problemáticas asociadas al acuífero Morroa están relacionadas con el aumento de la población, lo cual implica la expansión de servicios de todas índoles, así mismo la construcción de nuevas zonas de desarrollo urbanístico conlleva a la impermeabilización de suelos y a la alteración de diferentes ciclos naturales que disminuye la recarga natural del acuífero (Perry y Nawaz, 2008)

Por otro lado, la demanda del recurso es cada vez mayor, lo que ha conllevado a la degradación del recurso por sobreexplotación y generando mayores costos a la hora de extraer y comercializar el recurso, reflejándose en el aumento de las profundidades a la hora de construir los pozos de explotación a lo largo de los años (figura 4).

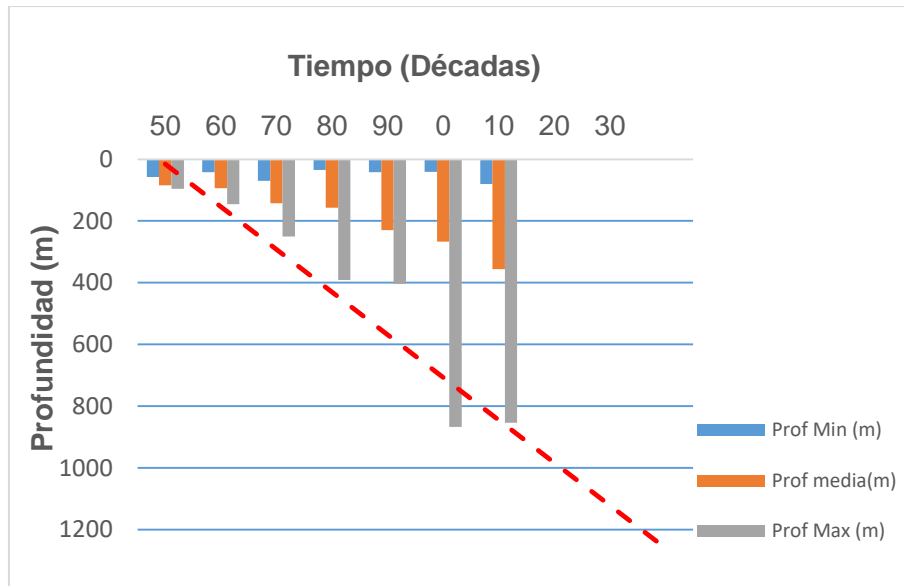


Figura 4. Variación de la profundidad de los pozos en el acuífero Morroa a lo largo de las décadas. Datos tomados del Sistema de información y gestión de aguas subterráneas de Carsucre (SIGAS).

La corporación autónoma regional de sucre CARSUCRE, ha venido adelantando avances significativos para combatir la sobreexplotación del acuífero y tratar de mantener los niveles piezométricos de éste. Una de las medidas que se han tomado para mitigar los descensos piezométricos del acuífero, es regular las concesiones, otorgándolas solo para uso doméstico.

La técnica de recarga artificial consiste en introducir agua al acuífero de manera no natural con el fin de incrementar la disponibilidad y/o mejorar la calidad de las aguas subterráneas (Custodio y Llamas, 1983). Desde el año 2006, CARSUCRE construyó obras piloto de recarga artificial en el predio El Tesoro, ubicado en el corregimiento Sabanas de Cali, en jurisdicción del municipio de Morroa, con el fin de monitorear y analizar el comportamiento de cada una de ellas. El objetivo final era, a futuro, implementar estas obras a gran escala, lo cual se está llevando a cabo actualmente en el predio Villa Vanessa. Las obras adelantadas consisten de una laguna de sedimentación, una laguna de infiltración, dos trincheras de infiltración y un pozo de gran diámetro.

Este proyecto tiene como fin analizar la información existente sobre las obras piloto de recarga artificial, calcular los caudales totales infiltrados por dichas obras y mirar

la relación existente entre ese caudal, los eventos de precipitación en la zona y la evapotranspiración.

1. GENERALIDADES

1.1 Preguntas de investigación

¿Son las obras de recarga artificial la técnica más viable como alternativa de mitigación a los descensos piezométricos del acuífero Morroa y los efectos negativos de la evapotranspiración?

¿Cuál es la obra de recarga artificial construida en el predio El Tesoro que genera más caudal y velocidad de infiltración?

1.2 Hipótesis

Las obras piloto de recarga artificial implementadas en el predio demuestran que la recarga artificial es una técnica viable para mitigar los descensos piezométricos del acuífero y minimizar los efectos negativos de la evapotranspiración en el acuífero Morroa.

1.3 Objetivo general

Analizar la eficiencia de las obras piloto de recarga artificial construidas en el acuífero Morroa como alternativa para minimizar el impacto de la evapotranspiración y los descensos piezométricos del acuífero.

1.4 Objetivos específicos

- Recopilar y analizar información secundaria acerca del acuífero Morroa y de las técnicas Recarga Artificial de Acuíferos (MAR).
- Organizar la información recolectada por CARSUCRE a lo largo de los años en las obras piloto de recarga artificial, con el fin de llevar a cabo gráficas donde se analicen los caudales y velocidades de infiltración.
- Analizar cómo han variado los niveles piezométricos del acuífero en el predio El Tesoro a partir del monitoreo realizado por Carsucre en el periodo 2008-2018.

- Realizar un balance hídrico donde se estime la relación existente entre la precipitación, la evapotranspiración y el volumen infiltrado por las obras piloto de recarga artificial en el acuífero Morroa.
- Analizar los resultados para determinar si las obras de recarga artificial son un método factible para combatir los descensos piezométricos del acuífero Morroa.

2. METODOLOGÍA

El proceso metodológico se dividió en cuatro etapas: consulta bibliográfica, análisis y procesamiento de datos, análisis de resultados y, por último, trabajo escrito, las cuales se presentan en la figura 5 y serán descritas a continuación:

2.1 Etapa de consulta bibliográfica

Se realizó la búsqueda de información bibliográfica, física y digital, asociada a la zona de estudio y a los métodos de recarga artificial de acuíferos. En cuanto a la consulta a la zona de estudio, se realizó con énfasis en la base de datos de entes gubernamentales del país como la corporación autónoma regional de Sucre (CARSUCRE), Servicio Geológico Colombiano (SGC), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Además, se consultaron estudios realizados por diferentes empresas privadas en convenio con CARSUCRE y por algunas universidades que han puesto su foco de atención en el acuífero Morroa. Entre los más relevantes se encuentra el Proyecto de protección integral de Aguas Subterráneas del acuífero de Morroa PPIAS (CARSUCRE,2005) y el trabajo de grado de la Universidad de Sucre titulado Diseño de las obras de recarga artificial para el acuífero de Morroa (Arias y Barrientos,2004). En cuanto a la técnica recarga artificial de acuíferos, se realizó una búsqueda de trabajos en los que se han puesto en práctica la técnica en Colombia y en diferentes lugares del mundo.

De igual forma se utilizó la plancha geológica 44 a escala 1:100.000 del municipio de Sincelejo, elaborada por INGEOMINAS, actualmente Servicio Geológico Colombiano, en el año 1998 y la plancha topográfica 44-IV-D a escala 1:25.000

elaborada por el IGAC. Se tuvo como insumo información SIG de la geodatabase (GDB) Cartobase de Sucre a escala 1:25.000 suministrada por CARSUCRE.

Cabe destacar, que en esta etapa se obtuvo la base de datos de las obras piloto de recarga artificial construidas por CARSUCRE, las cuales fueron parte esencial para la realización de este trabajo, a su vez se recopiló información de la estación agroclimática El Tesoro y de los piezómetros 44-IV-D-PZ-02 y 44-IV-D-PZ-04.

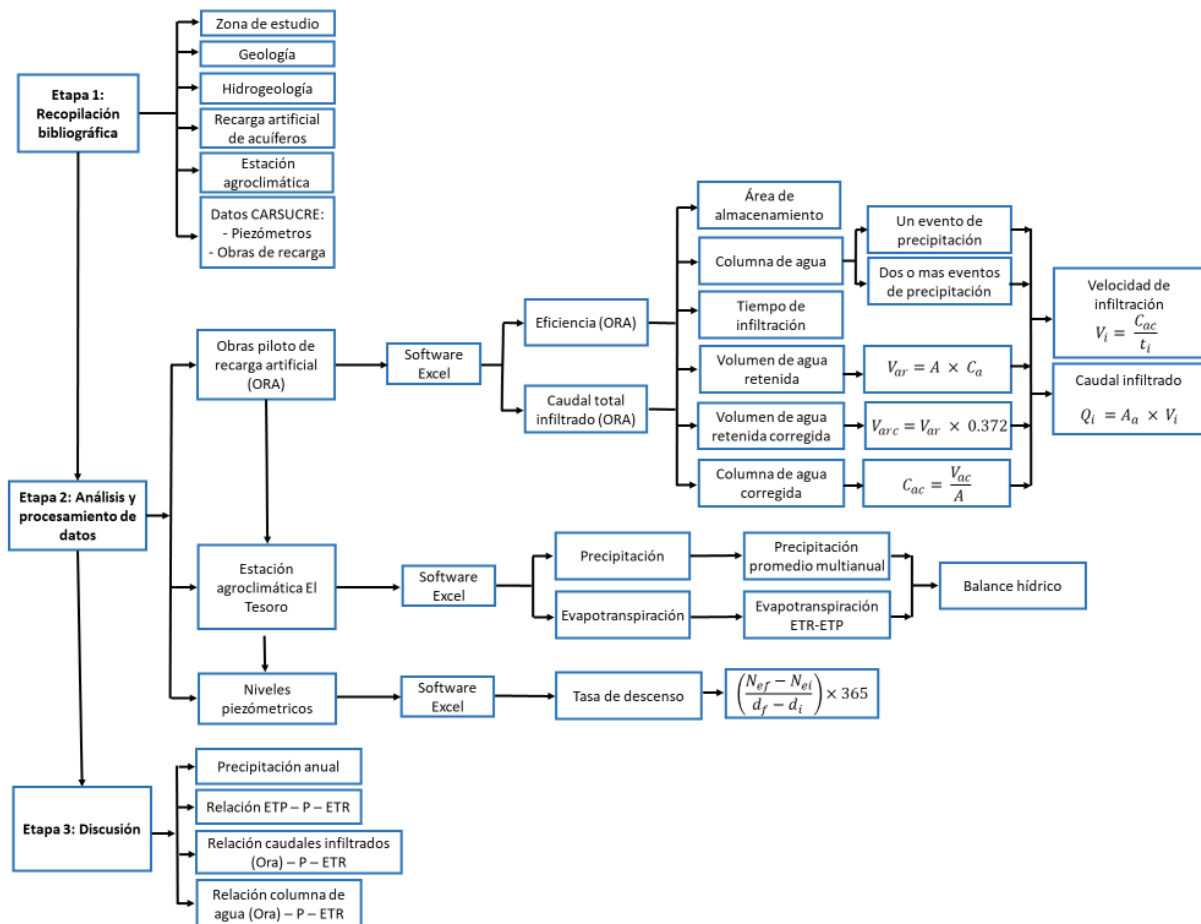


Figura 5. Flujograma metodológico. Obras de recarga artificial (ORA). V_{ar} : Volumen de agua retenida(m^3) , A :Área de almacenamiento [m^2], C_a : Columna de agua [m], V_{arc} : Volumen de agua corregida [m^3], C_{ac} : Columna de agua corregida [m], V_i : Velocidad de infiltración [m/s], t_i : Tiempo de infiltración [días], Q_i = Caudal infiltrado [m^3/s], ETP: evapotranspiración potencial [mm], ETR: evapotranspiración real [mm].

2.2 Análisis y procesamiento de datos

En esta etapa se llevó a cabo el procesamiento y análisis de la información suministrada por CARSUCRE. Para el procesamiento de los datos se utilizó el software Excel y con base en ellos se logró analizar los siguientes aspectos:

2.2.1 Eficiencia de obras piloto de recarga artificial

Teniendo en cuenta los datos suministrados por CARSUCRE del monitoreo de las obras piloto de recarga artificial, se tomaron fechas de eventos de precipitación en las cuales entraba agua a cada una de las obras simultáneamente. Esto, con el fin de evaluar la eficiencia de dichas obras realizando el análisis de la velocidad y el caudal infiltrado en cada una de estas.

Cabe destacar que los años analizados fueron desde el año 2008 hasta el año 2018, con excepción del año 2014 donde no se tienen datos suficientes debido a que las obras de recarga se encontraban en mantenimiento. También hay que aclarar que la trinchera 2 solo aparece en el año 2011 debido a que su construcción fue posterior al de las otras obras de recarga artificial construidas en el predio El Tesoro.

Para llevar a cabo el análisis de la velocidad y el caudal se hallaron los siguientes parámetros

- **Área de almacenamiento:** las áreas de almacenamiento de las obras de recarga se determinaron con base en las medidas de cada una de ellas, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Áreas de almacenamiento obras de recarga artificial (ORA).

Obra de recarga artificial	Área de almacenamiento (m²)
Pozo de gran diámetro	1.67
Trinchera de infiltración 1	5.50
Trinchera de infiltración 2	8.76
Laguna de infiltración	189

- **Columna de agua:** Se determinó teniendo en cuenta las medidas del nivel estático tomada por funcionarios de Carsucre en las obras de recarga artificial en cada uno de los eventos seleccionados previamente. Cabe destacar que para la obtención de la columna se realizaron dos procesos distintos dependiendo de las obras de recarga a tratar y de dos condiciones específicas de precipitación e infiltración, así:

Condición 1: un solo evento de precipitación el cual se infiltra en un periodo de tiempo determinado. Para este caso la columna de agua es el resultado de la diferencia entre la profundidad del piezómetro y el nivel del agua alcanzado en ese evento, en el caso de las trincheras de infiltración y el pozo de gran diámetro. En el caso de la laguna de infiltración se resta el nivel del agua y de la altura de esta obra.

Condición 2: se da cuando ocurre un evento de precipitación posterior antes de que se logre infiltrar la totalidad del agua del primer evento. En este caso, se realiza una resta entre el nivel final del evento y el nivel inicial de ese mismo evento y se prosigue con el siguiente evento. Esto para todas las obras de recarga artificial (Ver anexo 1).

- **Tiempo de infiltración (días):** el tiempo de infiltración es el tiempo que se demora en infiltrar un evento inicial, o hasta que se produce otro evento. Esto se determinó con base a los datos tomados en campo de los niveles estáticos de las obras de recarga.
- **Volumen de agua retenida (volumen de agua más grava):** el volumen de agua retenida es el producto de la multiplicación del área de almacenamiento de cada una de las obras, por la columna de agua.

$$V_{ar} = A \times C_a \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

V_{ar} : Volumen de agua retenida [m^3]

A : Área de almacenamiento [m^2]

C_a : Columna de agua [m]

- **Volumen de agua retenida corregida:** Es el resultado de multiplicar el volumen de agua retenida por un Coeficiente de infiltración del suelo (K_{fc}), este es de 0.372 y fue determinado por CARSUCRE a través de ensayos de infiltración con anillos concéntricos.

$$V_{arc} = V_{ar} \times 0.372 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

V_{arc} : Volumen de agua corregida [m^3]

V_{ar} : Volumen de agua retenida [m^3]

0.372: Constante de infiltración acumulada del suelo [adimensional]

- **Columna de agua corregida:** Se determinó al dividir el volumen de agua retenida corregida sobre el área de almacenamiento.

$$C_{ac} = \frac{V_{arc}}{A} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

C_{ac} : Columna de agua corregida [m]

V_{arc} : Volumen de agua corregida [m^3]

A: Área de almacenamiento [m^2]

- **Velocidad de infiltración:** Es el resultado de dividir la columna de agua corregida sobre el tiempo de infiltración.

$$V_i = \frac{C_{ac}}{t_i} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

V_i : Velocidad de infiltración [m/s]

C_{ac} : Columna de agua corregida [m]

t_i : Tiempo de infiltración [días]

- **Caudal infiltrado:** Es el resultado de multiplicar el área de almacenamiento de cada una de las obras de recarga con la velocidad de infiltración.

$$Q_i = A_a \times V_i \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

Q_i = Caudal infiltrado [m^3/s]

A_a = Área de almacenamiento [m^2]

V_i = Velocidad de infiltración [m/s]

Luego de encontrar cada una de estas variables, se realizó un promedio en el caso de la velocidad de infiltración y una sumatoria en caso del caudal de infiltración para cada año, se realizaron gráficas comparativas para cada año analizado y, a su vez, gráficas resúmenes donde se compararon cada una de las obras.

2.2.2 Caudal infiltrado total por las obras piloto de recarga artificial

Al igual que en la eficiencia de las obras de recarga artificial, se tomaron los datos suministrados por CARSUCRE y se realizó el mismo proceso descrito anteriormente. A diferencia del numeral anterior, se tuvieron en cuenta todos los eventos de precipitación registrados al momento de la toma de datos y se estudió cada obra por separado, lo que dio como resultado un valor representativo de cuál ha sido el caudal infiltrado a lo largo de los años por cada una de las obras de recarga artificial.

2.2.3 Niveles piezométricos

De acuerdo a los datos proporcionados por CARSUCRE, de los niveles estáticos de los piezómetros 44-IV-D-PZ-02 y 44-IV-D-PZ-04, los cuales se encuentran ubicados dentro del predio El Tesoro y que tienen como fin monitorear los niveles superiores del acuífero Morroa, se calculó en el software Excel la tasa de descenso de estos niveles y se realizaron graficas de dispersión para ver la variación a lo largo del tiempo.

La tasa de descenso se calcula de la siguiente manera:

$$Tasa\ de\ descenso = \left(\frac{N_{ef} - N_{ei}}{d_f - d_i} \right) \times 365 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

N_{ef} = Nivel estático final [m]

N_{ei} = Nivel estático inicial [m]

d_f = Día final

d_i = Día inicial

Cabe anotar, que el nivel estático y el día inicial no varían, van cambiando el nivel estático final y el día final con cada una de las medidas que se adicionan a partir de los datos iniciales tomados.

2.2.4 Estación agroclimática El Tesoro

La estación agroclimática El Tesoro fue construida por el IDEAM en el año 2005 con el fin de monitorear las condiciones agroclimáticas en las obras de recarga artificial. De esta estación se tomaron datos como:

- Precipitación acumulada diaria, de donde se obtuvo la precipitación promedio multianual y la precipitación acumulada anual (sumatoria de los eventos de precipitación ocurridos diariamente, en todos los meses del año), para un periodo de tiempo entre el año 2008-2018. Cabe destacar que la estación agroclimática El Tesoro, tenía algunos datos faltantes en el periodo de tiempo analizado; estos fueron rellenados por medidas hechas por personal de CARSUCRE de manera manual en el totalizador de aguas lluvias, el cual se mide después de cada evento de precipitación.
- Temperatura media del aire a 10 cm del suelo, datos que fueron esenciales para calcular la evapotranspiración potencial por medio del método de Thornthwaite, y real por el método de Budyko, como se explica más adelante. Cabe destacar que de la estación El Tesoro el 15.9% de los datos tomados en el periodo de tiempo estudiado eran faltantes. Por esta razón, se tomaron los datos faltantes de la estación climática Rafael Barbo, la cual se encuentra aproximadamente a dos kilómetros de distancia del área de estudio.

2.2.4.1 Evapotranspiración Potencial, método de Thornthwaite

La evapotranspiración potencial se calculó por medio del método de Thornthwaite, para los años comprendidos entre el 2008 y el 2018, tomando un calendario que va desde enero a diciembre de cada año.

En este método se calculó un índice de calor mensual (i) a partir de temperaturas medias mensuales del aire, a partir de la fórmula:

$$i = (t/5)^{1.514} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

i : Índice de calor mensual [°C]

t : temperatura media mensual del mes j [°C]

Se tomaron las temperaturas medias del aire a 10 cm del suelo, de la estación agroclimática El tesoro, se les estimó el promedio mensual y se calculó (i).

A partir de esto se obtuvo el índice de calor anual (I) que es la suma de los doce índices de calor mensual para meses teóricos.

Con todos estos datos Thornthwaite propone la siguiente fórmula para la evapotranspiración potencial:

$$ETP_{sin\ corregir} = \left(\frac{10t}{I}\right)^a * 1.6 \quad \text{Ecuación 8}$$

donde:

ETP : evapotranspiración potencial del mes j, sin corregir [cm/mes]

t : temperatura media mensual del mes j [°C]

I : índice de calor anual [°C]

a : ecuación cubica de la forma:

$$a = 6.75 * 10^{-7} I^3 - 7.71 * 10^{-5} I^2 + 0.017925 I + 0.49239$$

Ecuación 9

Luego de que se obtuvo la evapotranspiración potencial de cada mes del año, sin corregir, se procedió a hacer la corrección, que consiste en multiplicar la evapotranspiración potencial del mes, hallada anteriormente, por los factores de corrección de evapotranspiración potencial mensual, el cual es un valor n distinto para cada mes.

El factor de corrección (FC), se calcula según el número de días del mes (tabla 2) y el número de horas de sol. Este factor, es distinto para cada mes del año dependiendo de la latitud en la que nos encontremos, para el caso de estudio, las horas de sol fueron calculadas con base en la tabla 3.

Tabla 2. Número de días del mes.

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Días	31	28/29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31

Tabla 3. Número de horas de sol.

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
N	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.1	11.8	11.65	11.5

La fórmula para hallar este valor de corrección es:

$$FC = \frac{N}{12} \frac{d}{30} \quad \text{Ecuación 10}$$

donde:

FC : factor de corrección de evapotranspiración potencial mensual [adimensional].

N : número máximo de horas sol.

d : número de días del mes.

De esta manera se obtuvo la evapotranspiración potencial corregida, luego se realizó la conversión de cm a mm y por último se obtuvo la evapotranspiración potencial promedio multianual y la evapotranspiración potencial para cada año. Ver anexo 4.

2.2.4.2 Evapotranspiración real, método Budyko

La evapotranspiración potencial se transformó a evapotranspiración real mediante la ecuación de Budyko (Budyko, 1974), como se puede observar en el anexo 4:

$$ETR = \left\{ ETP \cdot P \cdot \tan \left(\frac{P}{ETP} \right) \left[1 - \cos \left(\frac{ETP}{P} \right) + \sin \left(\frac{ETP}{P} \right) \right] \right\}^{1/2}$$

Donde:

ETR : evapotranspiración real [mm/mes]

ETP : evapotranspiración potencial [mm/mes]

P : precipitación media [mm/mes]

3. ZONA DE ESTUDIO

3.1 Localización

El acuífero Morroa se localiza en el noroccidente de Colombia, en la región caribe. Posee una extensión aproximada de 900 km^2 , de los cuales 645 km^2 corresponden a área superficial (IDEAM, 2015). El área superficial se extiende sobre los departamentos de Córdoba y Sucre, siendo en la parte central de este último donde se concentra la mayor área, en los municipios de Sincelejo, Corozal, Los Palmitos, Ovejas, Sampedra y Morroa, ubicados en las subregiones Montes de María y Sabanas.

Las obras piloto de recarga artificial se encuentran construidas en el corregimiento Sabanas de Cali, en jurisdicción del municipio de Corozal localizado en el noroeste del departamento de Sucre, a 15 km de la ciudad de Sincelejo, en la plancha topográfica 44-IV-D, elaborada por el IGAC a escala 1:25.000 (Figura 6).

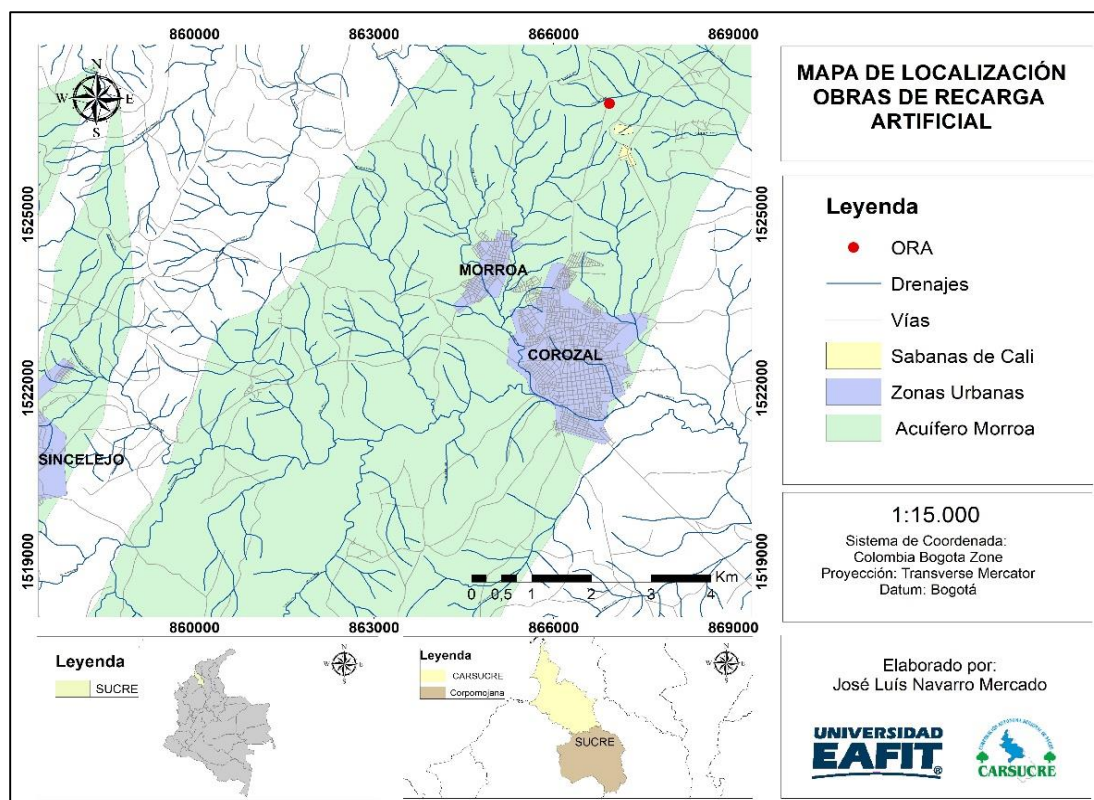


Figura 6. Mapa de localización de la zona de estudio. Elaboración propia.

3.2 Hidrografía

La zona de estudio está representada hidrográficamente por un sistema de corrientes superficiales temporales, las cuales solo llevan agua en épocas de lluvia; sin embargo. Estas corrientes se abastecen de aguas residuales e industriales de los principales municipios de la zona. El arroyo Grande de Corozal, el cual nace en Sincelejo y luego se encuentra con el arroyo Morroa, bañando la zona de recarga del acuífero, y que tiene como principales afluentes el arroyo Pintao, el arroyo San Miguel y el arroyo El Cauca, recibe las aguas residuales de los municipios de Sincelejo, Corozal y Morroa. Lo mismo sucede con los arroyos Caracolí, Canoas y Mancomojan, en los cuales se vierten las aguas negras de los municipios de Los

Palmitos, Sampués y Ovejas, respectivamente, afectando de manera directa la zona de recarga del acuífero Morroa (figura 7) (CARSUCRE, 2005).

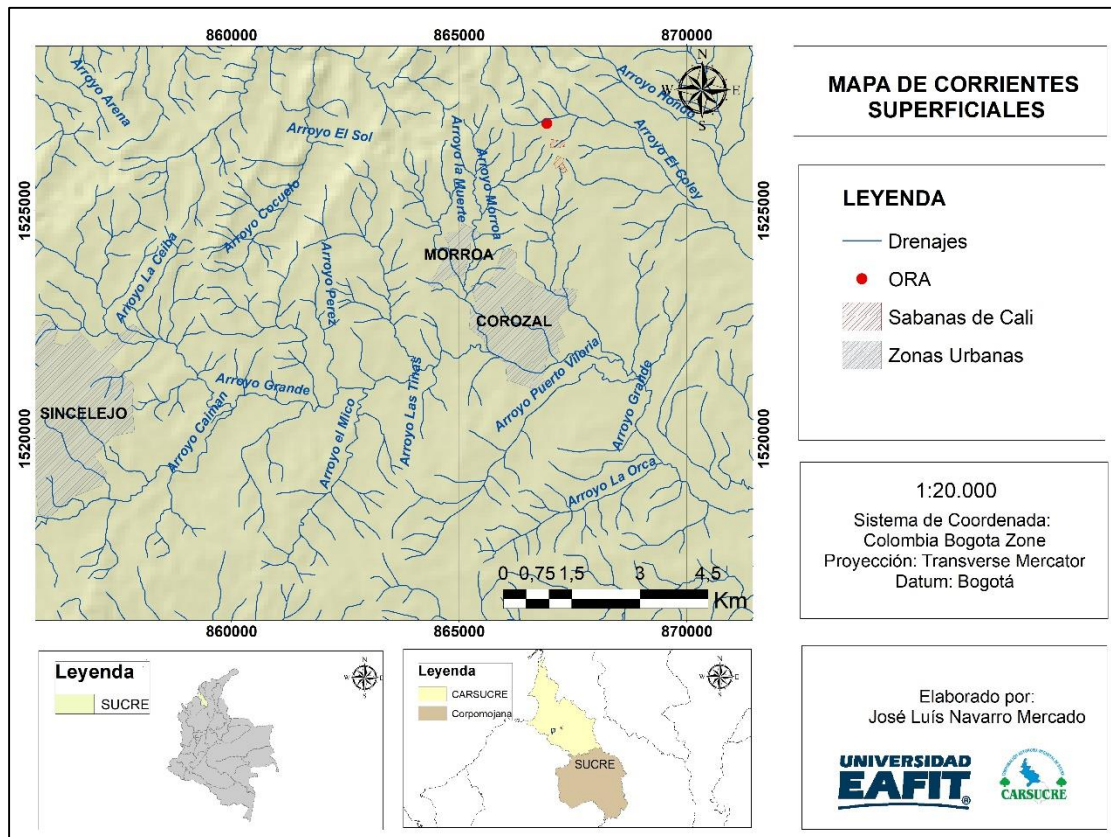


Figura 7. Mapa de corrientes superficiales. Elaboración propia.

3.3 Clima

El clima de la zona de estudio se define según la clasificación de Koppen (1990) como tropical lluvioso de sabana con invierno seco (Aw), característico de una formación alternativamente húmeda y seca, donde dominan áreas de pastizales con alternancia de bosques secundarios y matorrales.

Según el comportamiento global bioclimático y el sistema de clasificación de zonas de vida definido por Holdridge, citado por De La Ossa (1998), se define como bosque seco tropical (bs-T), perteneciente al sistema Bioma Azonal de tierras bajas (Pedobioma de Sabanas).

La temperatura promedio de la zona es de 28°C y la precipitación media anual es de 1103 mm (CARSUCRE, 2005). Se distinguen una época seca de diciembre a marzo y otra lluviosa de mayo a octubre, con un pequeño verano entre junio y julio (ver figura 8).

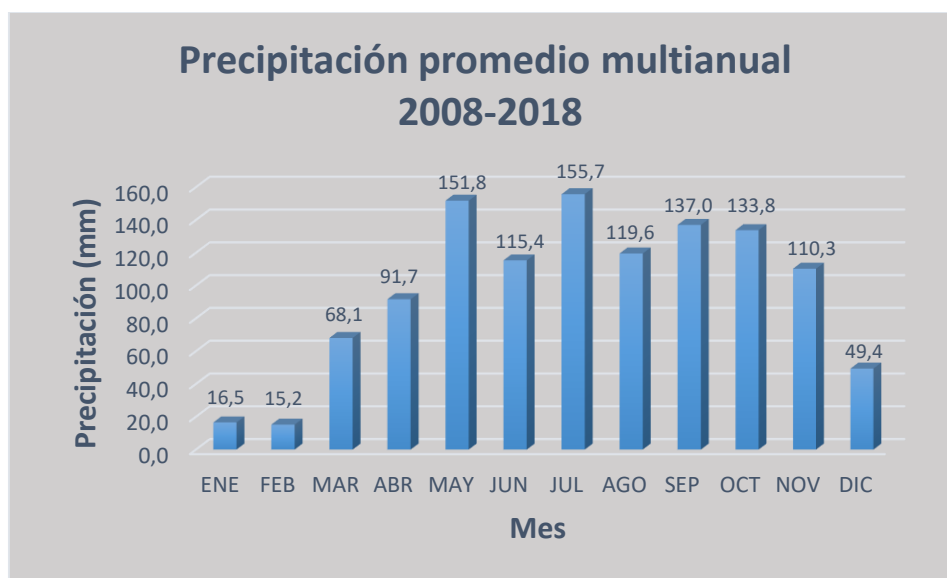


Figura 8. Precipitación promedio multianual. Elaboración propia.

4 MARCO GEOLÓGICO

En el departamento de Sucre afloran rocas sedimentarias y sedimentos no consolidados con edades que van desde el Cretáceo Superior al Cuaternario. Estas rocas son de origen marino, transicional y continental y algunas de ellas se caracterizan por tener buenas propiedades hidráulicas para el almacenamiento y transmisión de agua (CARSUCRE, 2005).

Las principales formaciones que afloran en la zona de estudio son la Formación Sincelejo, Formación Morroa, Formación Betulia y Depósitos Aluviales (Figura 9). La formación Sincelejo fue definida por Kassem (1964) en dos miembros: Sincelejo Inferior y Sincelejo Superior. Posteriormente, en el año 2002, Clavijo y colaboradores utilizan el nombre de Formación Sincelejo en un sentido más amplio y proponen dividirla en un Miembro Inferior que comprende el Sincelejo Inferior y Superior de Kassem (1964) y un Miembro Superior que incluye la formación Morroa.

Esta subdivisión es acogida y utilizada en el presente e infrayace a la Formación Betulia (Figura 10).

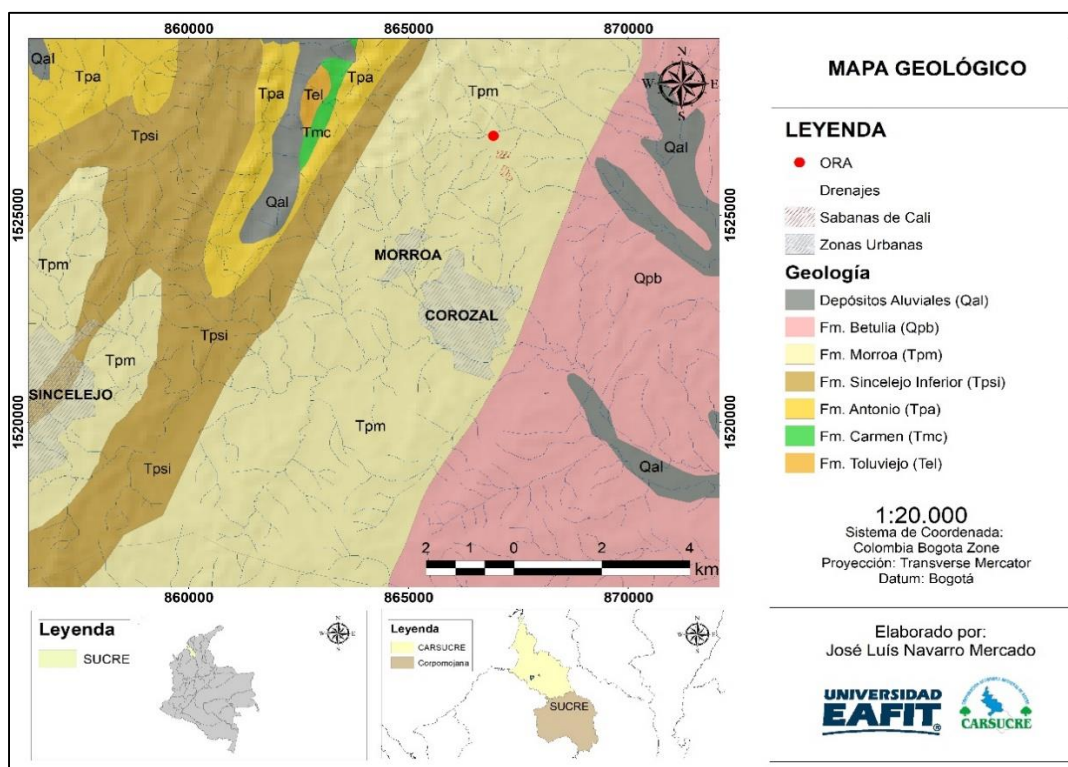


Figura 9. Mapa geológico de la zona de estudio. Elaboración propia.

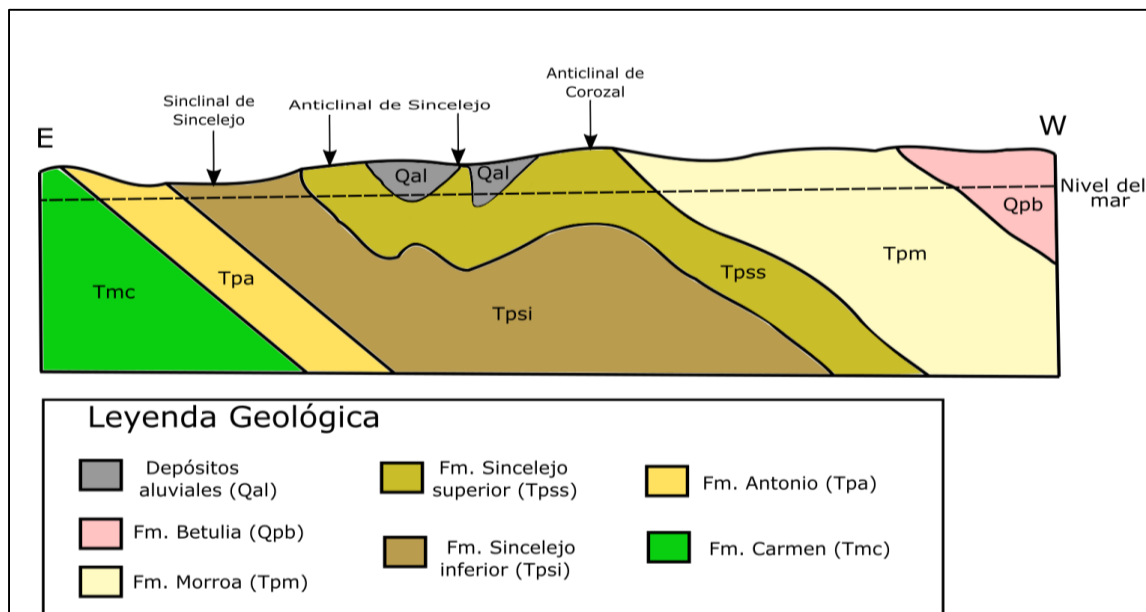


Figura 10. Corte regional esquemático de las formaciones que afloran en la zona de estudio. Tomado y modificado de (Herrera, 1994).

A continuación, en la tabla 4, se presenta una breve descripción de cada una de las formaciones según (Ingeominas, 2000).

Tabla 4. Características de las unidades geológicas. Elaboración propia, información tomada y modificada de (CARSUCRE,2005)

Unidad geológica	Litología
Depósitos Aluviales (Qal)	Se caracterizan por una serie de arenas mal gradadas, con intercalaciones de arcillas, con espesores que varían entre 0 y 15 metros.
Formación Betulia (Qpb)	Constituida por una secuencia monótona de arcillas abigarradas con intercalaciones de arcillas arenosas, arcillas con gravas y delgadas capas y lentes de arenas arcillosas. INGEOMINAS (2000) propuso subdividir la unidad en un conjunto arcilloso hacia la base y un conjunto arenoso hacia la parte superior.
Formación Morroa o miembro Superior de Sincelejo (Tpm)	Capas de areniscas friables y conglomerados poco consolidados, intercalados con capas de arcillolitas, producto de la sedimentación detrítica en un ambiente típico de abanico aluvial y cauces aluviales.
Formación Sincelejo Inferior (Tpsi)	Conjunto de areniscas arcillosas “sucias” con cemento arcilloso calcáreo, capas conglomeráticas y un conjunto arcilloso.

5 MARCO HIDROGEOLÓGICO

5.1 Definiciones

Provincias Hidrogeológicas: Corresponden a unidades mayores referidas a escalas menores (entre 1:10.000.000 y 1:500.000), definidas con base en unidades tectonoestratigráficas separadas entre sí por rasgos estructurales regionales, que coinciden con límites de cuencas geológicas mayores y que, desde el punto de vista hidrogeológico y a la escala nacional, corresponden a barreras impermeables representadas por fallas regionales y altos estructurales. Las barreras son consideradas impermeables a la escala nacional, pero a nivel regional pueden albergar sistemas acuíferos importantes con porosidad secundaria. (IDEAM, 2010).

Sistemas Acuíferos: Corresponde a un dominio espacial limitado en superficie y en profundidad, en el que existen uno o varios acuíferos con porosidad primaria o secundaria, relacionados o no entre sí, pero que constituyen una unidad práctica para la investigación o explotación (ITGE, 1971, 1987; WMO, 2012 en IDEAM 2013).

Acuífero: “Unidad de roca o sedimento, capaz de almacenar y transmitir agua, entendida como el sistema que involucra las zonas de recarga tránsito y descarga.

Acuitardo: materiales que almacenan agua, pero solo permiten el flujo muy lento de ella por sus condiciones semipermeables o impermeables (IDEAM, 2013).

Acuicludo: rocas impermeables que pueden contener agua, pero no permiten su flujo en cantidades significativas. Algunos autores prefieren utilizar para esta unidad el término (IDEAM, 2013).

Acuifugas: materiales que no contienen ni permiten el flujo de agua; son considerados materiales impermeables (IDEAM, 2013).

5.2 Sistemas Acuíferos

En el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2010) se realizó una división del territorio nacional en 16 provincias hidrogeológicas, las cuales fueron definidas con base en unidades tectonoestratigráfica separadas entre sí por rasgos estructurales regionales. Estas provincias coinciden con los límites de las cuencas sedimentarias mayores, definidas por la Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH (Barreto et al, 2007) y que hidrogeológicamente corresponden a barreras impermeables, como fallas regionales y altos estructurales (IDEAM, 2010).

La zona de estudio se encuentra ubicada en la provincia hidrogeológica denominada Sinú-San Jacinto (PC1), la cual limita al norte con el mar Caribe, al sur con las estribaciones de las cordilleras Central y occidental, al oriente con el sistema de fallas de Romeral (que, a su vez, junto con el basamento, conforman barreras impermeables) y al suroccidente con el sistema de fallas del río Atrato (IDEAM, 2010; Figura 11).

Dentro de cada una de las provincias definidas en el ENA 2010, se reconocieron unidades hidrogeológicas como acuíferos, acuitardos, acuicludo y acuifugas, que por sus características de porosidad y permeabilidad tienen diferentes condiciones para almacenar y permitir el flujo de agua. Con base en esto, en el Estudio Nacional del Agua, para el año 2014 (IDEAM, 2015), se realizó una subdivisión de estas

provincias hidrogeológicas en sistemas acuíferos y se identificaron y caracterizaron 61 sistemas acuíferos para todo el territorio colombiano.

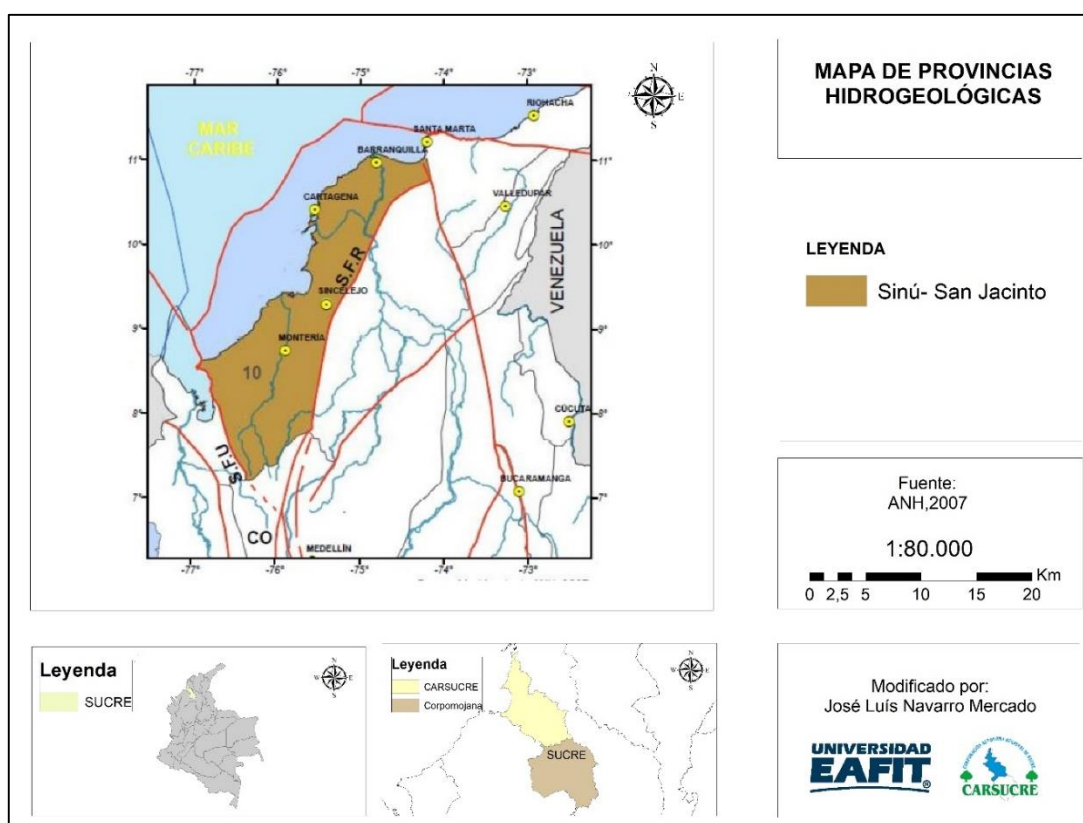


Figura 11. Mapa de provincia hidrogeológicas de Colombia. Tomado y modificado de IDEAM, 2010

Para la provincia hidrogeológica Sinú-San Jacinto (PC1), se definieron 12 sistemas acuíferos, de los cuales se encuentran en el departamento de Sucre los acuíferos Golfo de Morrosquillo (SAC 1.2), Tolviejo (SAC 1.10) y Morroa (SAC 1.1), siendo este último el de mayor importancia.

La Corporación autónoma regional de sucre (CARSUCRE), dentro de su jurisdicción, define seis sistemas acuíferos, los tres ya mencionados anteriormente y los acuíferos Sincelejo y Betulia, que están incluidos en un gran sistema acuífero definido en el ENA 2014 como acuífero La Mojana (SAC 2.2) y que se encuentra ubicado dentro de la provincia hidrogeológica Valle Bajo del Magdalena (PC2).

Cabe destacar que CARSUCRE divide el acuífero de Betulia en dos acuíferos, el ya mencionado Betulia y el acuífero denominado El Roble y, a su vez, incluye dentro

de su jurisdicción tres sistemas que no son definidos como acuíferos, pero que son de importancia hidrológica en el departamento, como lo son El Carmen, Labarcé y San Cayetano, estos son definidos como unos acuitardos (ver figura 12).

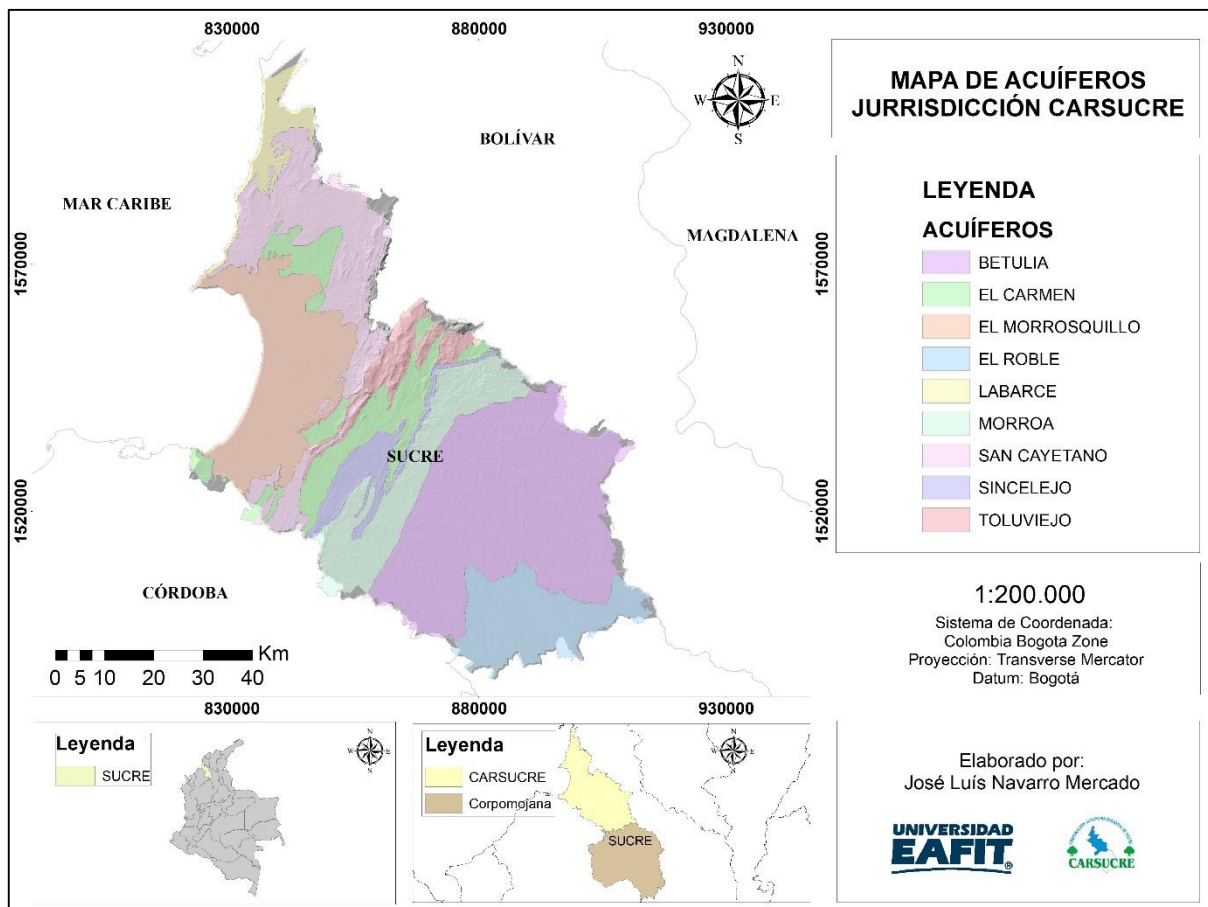


Figura 12 .Sistemas acuíferos, jurisdicción CARSUCRE. Elaboración propia.

5.2.1 Acuífero Morroa

El acuífero Morroa (figura 13) es definido como un acuífero complejo, continuo y de extensión regional. Está constituido por diferentes capas confinadas y semiconfinadas, intercalaciones de areniscas, conglomerados y capas de arcillolitas, todas ellas producto de la sedimentación detrítica de un ambiente tipo abanico aluvial y cauces aluviales. Estructuralmente se encuentra en un monoclinal de la formación Morroa, con una dirección general N 25° E y buzamientos que varían entre 5° y 20° al este. (CARSUCRE, 2005).

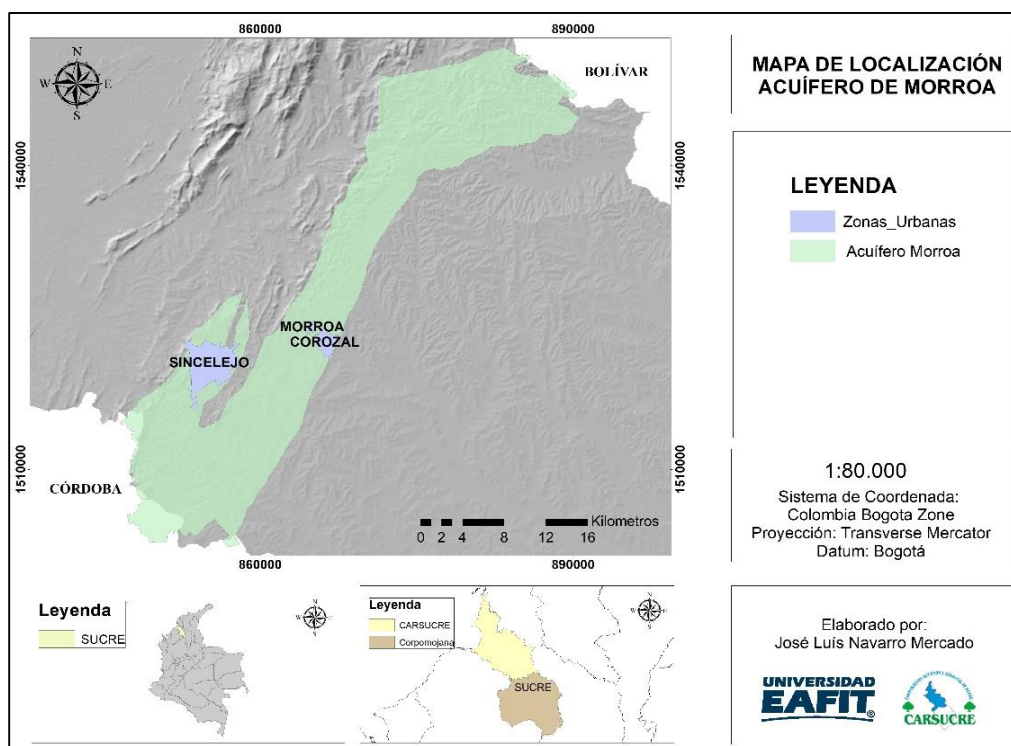


Figura 13. Mapa acuífero Morroa. Elaboración propia.

En la tabla 5 se muestran las principales características del acuífero Morroa.

Tabla 5. Características generales del acuífero Morroa.

Espesor máximo	Transmisividades	Conductividades hidráulicas	Coefficientes de almacenamiento	Recarga potencial (precipitación)	Tipo de agua
500 m	7.5 - 603 m ² /día	4 - 12 m/día	1.1×10^{-3} - 1.1×10^{-4}	371.3 mm/año	Bicarbonatadas cálcicas y sódicas.

5.2.1.1 Unidades hidrogeológicas

Con base en las características geológicas e hidrogeológicas y el comportamiento de cada una de las formaciones en la zona de estudio, FINAGUAS, en el año 2001, definió cuatro unidades hidrogeológicas U.H.1, U.H.2, U.H.3 y U.H.4 (tabla 6 y figura 14). La unidad hidrogeológica tres (U.H.3) es la unidad que comprende la formación Morroa. Esta se subdivide hidrogeológicamente en cuatro unidades que, a su vez, se conforman de varios niveles acuíferos (figura 15), como se verá a continuación en la tabla 7 y tabla 8.

Tabla 6. Características de las unidades hidrogeológicas.

	Formación	Características geológicas	Características hidrogeológicas
U.H.1	Depósitos aluviales	Arenas mal gradadas con intercalaciones de arcillas	
U.H.2	Formación Betulia	Secuencia monótona de arcillas abigarradas con intercalaciones de arcillas arenosas, arcillas con gravas, lentes de arenas arcillosas.	Capas permeables las cuales se encuentran confinadas y tienen espesores variables. Esta unidad es predominantemente arcillosa, por lo que se podría definir como un acuitardo.
U.H.3	Formación Morroa	Areniscas friables y conglomerados pocos consolidados intercalados con capas de arcillolitas	De gran importancia por su riqueza hídrica en la región. En esta unidad se centra este trabajo, por lo cual sus características hidrogeológicas serán analizadas con más detalle posteriormente.
U.H.4	Formación Sincelejo	Areniscas arcillosas con cemento arcilloso calcáreo, capas conglomeráticas	Presenta permeabilidad primaria baja y una permeabilidad secundaria moderada a baja, debido a su grado de consolidación. La calidad fisicoquímica del agua es regular.
	Formación Antonio	Areniscas compactas y arcillolitas con intercalaciones de nódulos de areniscas calcáreas	

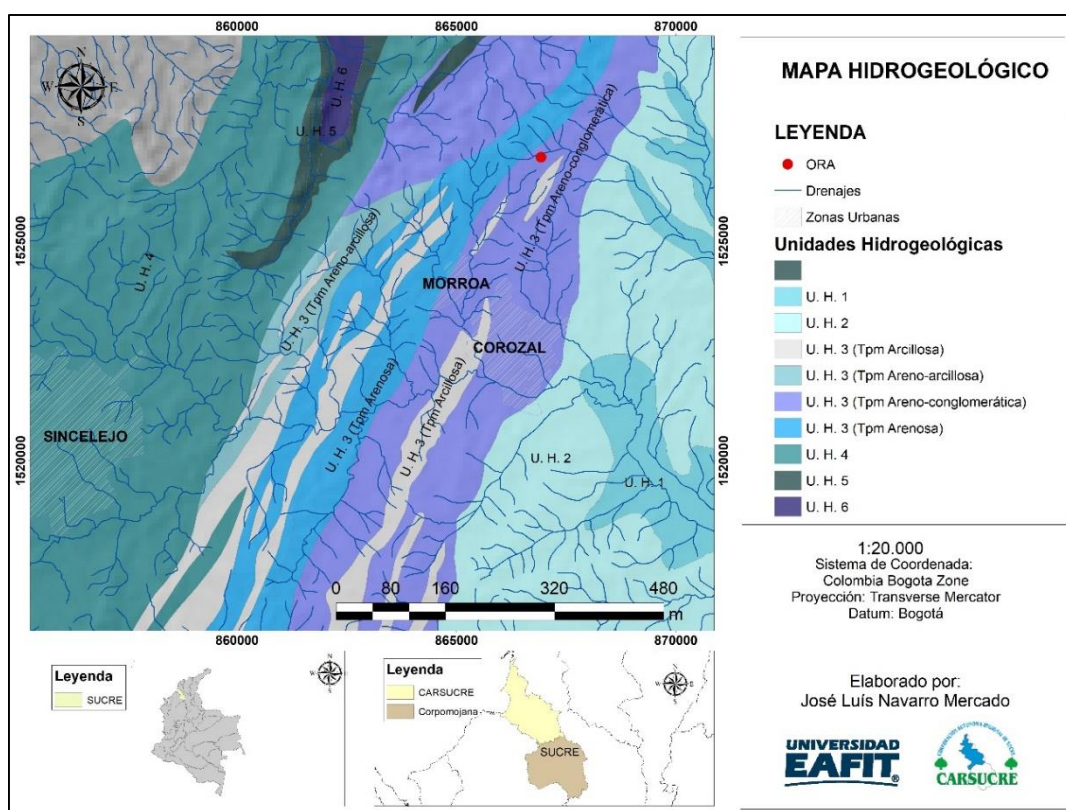


Figura 14. Mapa unidades hidrogeológicas de la zona de estudio. Elaboración propia.

Tabla 7.Niveles de acuíferos de la unidad hidrogeológica 3 (U.H.3) (Tomado de CARSUCRE,2005).

Unidad hidrogeológica	Unidades geológicas	Niveles acuíferos
U.H.3	Morroa Areno-Conglomeráticas	A-B
	Morroa Arenosa	C-D
	Morroa Areno-arcillosa	E-F
	Morroa Arcillosa	Capas y lentes que dividen los niveles acuíferos de la formación

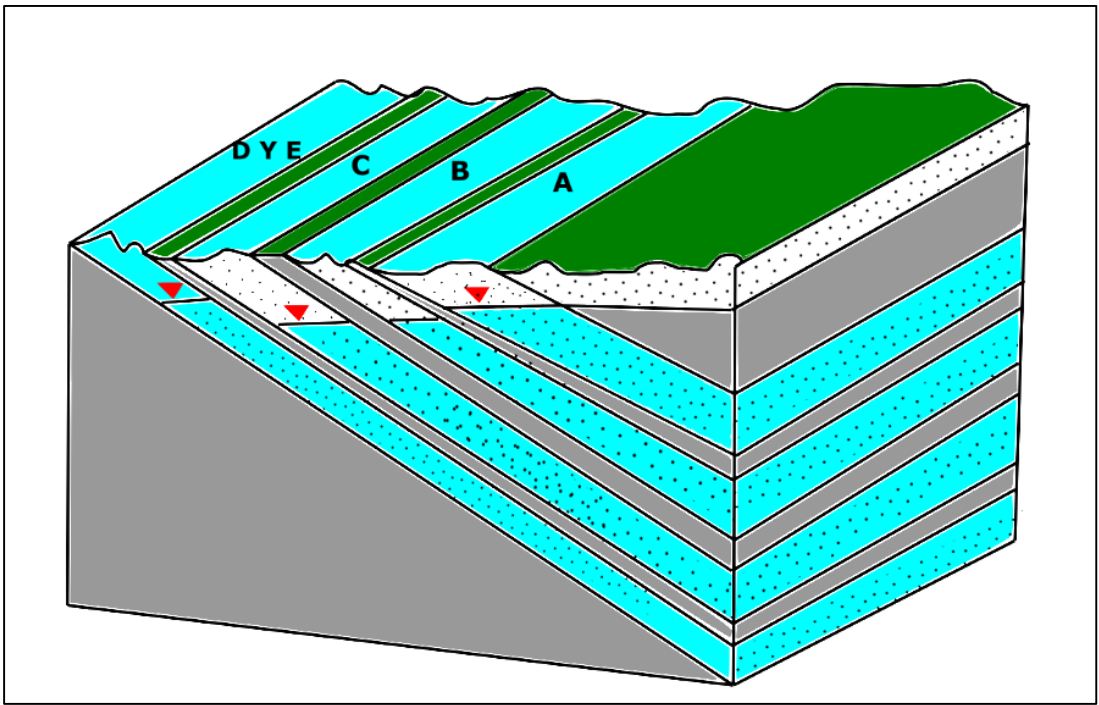


Figura 15.Bloque Diagrama esquemático de los niveles de la U.H.3 Tomado y modificado de (Carsucre,2005)

Tabla 8. Características de los niveles de acuíferos de U.H.3. (Tomado de CARSUCRE,2005)

Nivel acuífero	Litología	Permeabilidad	Conductividad hidráulica	Espesor	Buzamiento
A	Arenisca lítica de color gris claro y pardo, de grano	Primaria alta	2.8 m/día	30-226 m	5-10° E

Nivel acuífero	Litología	Permeabilidad	Conductividad hidráulica	Espesor	Buzamiento
	fino a grueso con lentes conglomeráticos y algunas capas y lentes de arcilla.				
B	Areniscas friables de color amarillo ocre, de grano fino a medio, con lentes y capas de gravas sueltas hacia el techo y capas delgadas de arcillas finamente estratificadas	Primaria moderada a alta	0.5 m/día	38-164 m	10-15° E
C	Areniscas líticas finas de color gris, areniscas líticas medias ferruginosas y lentes de arcillolitas	Primaria alta	---*	40-60 m	15° E
D	Areniscas líticas de color amarillo grisáceo algo consolidados, de grano medio, areniscas finas arcillosas, lentes conglomeráticos y lentes arcillosos.	Primaria baja a moderada	---	40-50 m	15° E
E	Areniscas líticas de color amarillo grisáceo algo consolidados, areniscas finas arcillosas y lentes arcillosos.	Primaria moderada a alta	---	40-60 m	15° E
F	Areniscas líticas finas a medias, algo consolidadas, areniscas finas arcillosas con concreciones	Primaria baja	---	---	15-25° E

Nivel acuífero	Litología	Permeabilidad	Conductividad hidráulica	Espesor	Buzamiento
	endurecidas de areniscas calcáreas; lentes conglomeráticas y lentes arcillosos.				
* CARSUCRE no cuenta con esta información					

6 Obras de Recarga Artificial

De manera estratégica, dentro del predio El Tesoro fueron construidas en el año 2006 las obras piloto de recarga artificial, con el fin de realizar un análisis para mirar si la recarga artificial de acuíferos es un método factible a la hora de contrarrestar la sobre explotación del acuífero Morroa. Las obras piloto de recarga artificial han sido el punto de partida para diseñar otras obras en la zona, como las que se encuentran construyendo actualmente en el predio Villa Vanesa. Es por esto que es de suma importancia el monitoreo y el análisis de los datos obtenidos en cada una de estas obras.

6.1 Descripción general y funcionamiento de las obras.

Las obras piloto de recarga artificial se componen de un muro de contención que desvía el agua de una cuenca hacia el sistema de obras, el agua ingresa a una laguna de sedimentación, la cual consta de tres serpentines donde se disminuyen los sedimentos en suspensión antes de ingresar al sistema de recarga artificial.

Luego de que se logran disminuir los sedimentos productos de la escorrentía, el agua pasa a la trinchera de infiltración 1, al pozo de gran diámetro y a la laguna de infiltración, donde se dispone la columna de agua para ser infiltrada. El agua que no se logra infiltrar en la laguna de infiltración, pasa a unos filtros, diseñados para mejorar la calidad del agua antes de llegar a la alberca, lugar donde se trata el agua antes de ser inyectada al pozo de inyección, el cual funciona por gravedad. Existe

una trinchera 2, la cual recibe láminas de agua excedentes de la laguna de infiltración. En la figura 16 se muestra el plano de las obras de recarga artificial del predio el Tesoro.

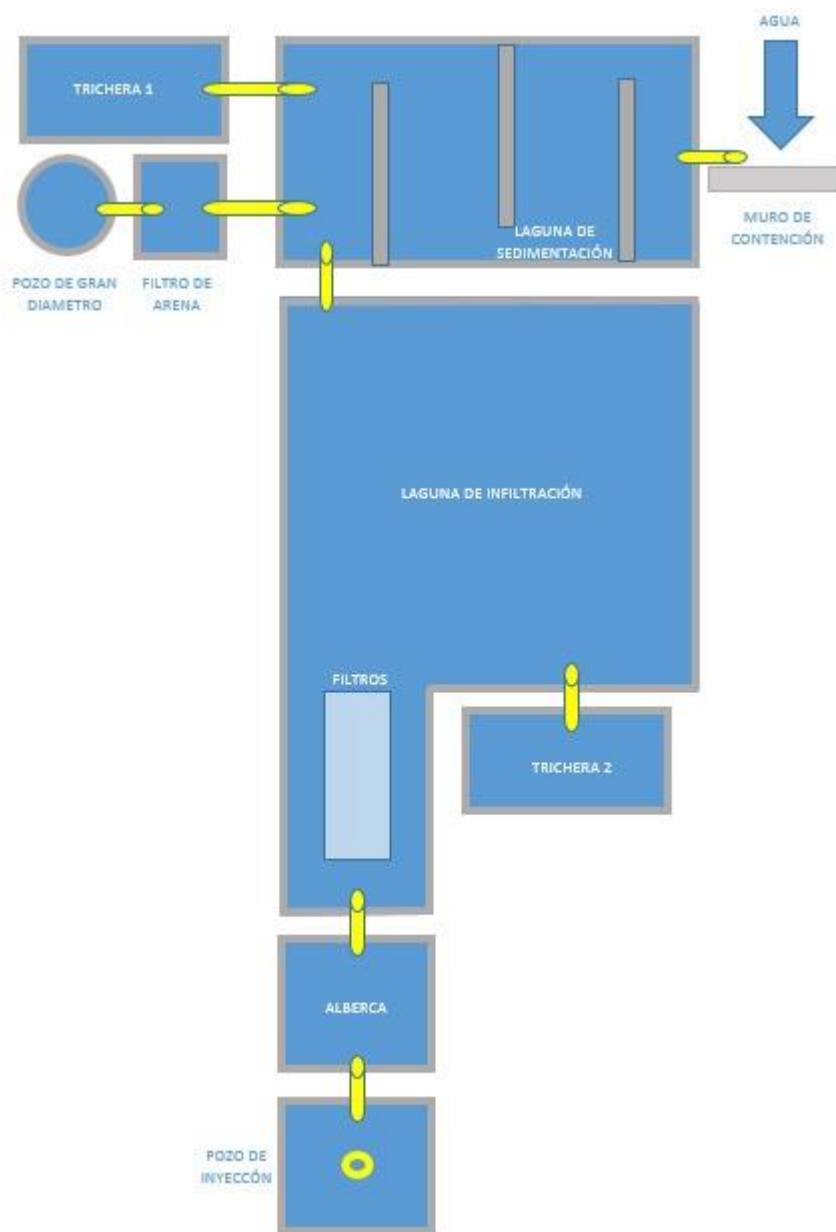


Figura 16. Plano esquemático del sistema de obras piloto de recarga artificial en el predio el Tesoro. Elaboración propia.

- Muro de contención: muro de 1 m de altura, cuya función es retener y desviar el agua de escorrentía dentro de la cuenca el Tesoro hacia las obras de recarga artificial. (Figura 17).

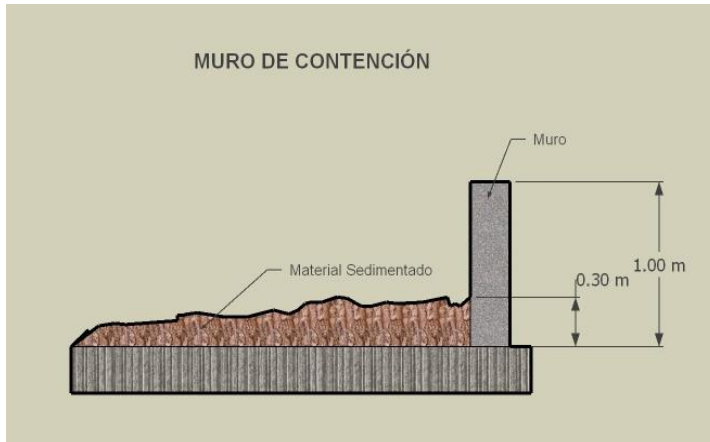


Figura 17. Plano y fotografía del muro de contención.

- Laguna de sedimentación: se compone de cuatro serpentines cuyo objetivo es quitarle los sólidos en suspensión a la corriente de agua antes de ingresar al sistema de recarga artificial (Figura 18).

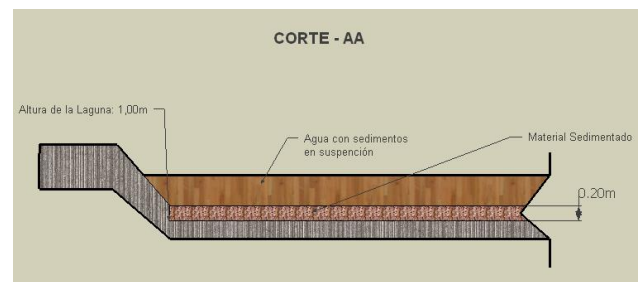
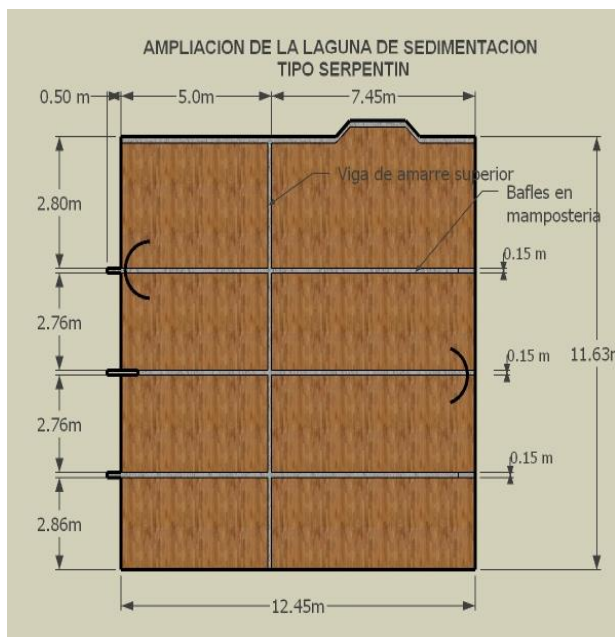


Figura 18. Plano y fotografía de la laguna de sedimentación.

- Trinchera de infiltración 1: consta de una tubería ranurada, en forma de T, un tubo ranurado como piezómetro, un lecho de grava de 30 m³ y un filtro de arena de 15 m³, como se ve en la figura 19.

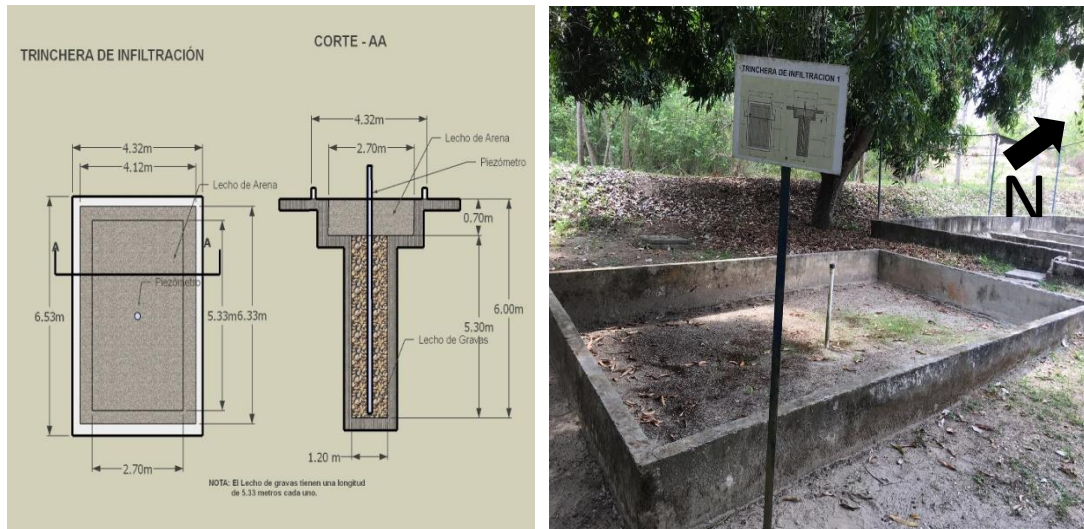


Figura 19. Plano y fotografía de la Trinchera de infiltración 1

- Laguna de infiltración: constituida por una capa de grava y un lecho de arena (figura 21).

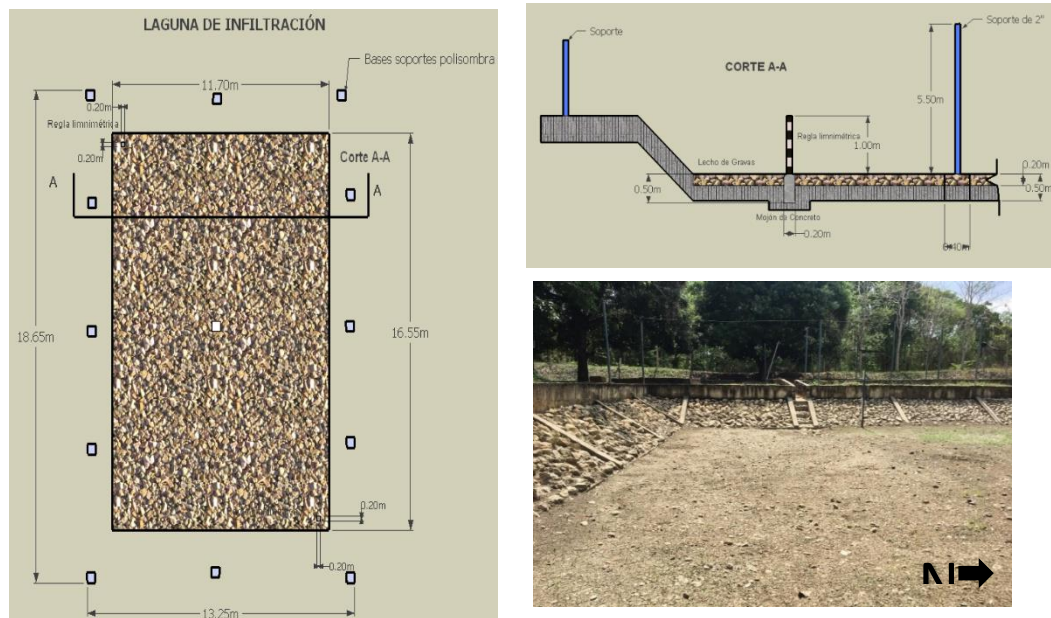


Figura 20. Planos y fotografía de la laguna de infiltración.

- Pozo de gran diámetro: constituido por un filtro de arena, un lecho de gravas de 12.36 m^3 y un tubo ranurado como piezómetro como se muestra en la figura 20.

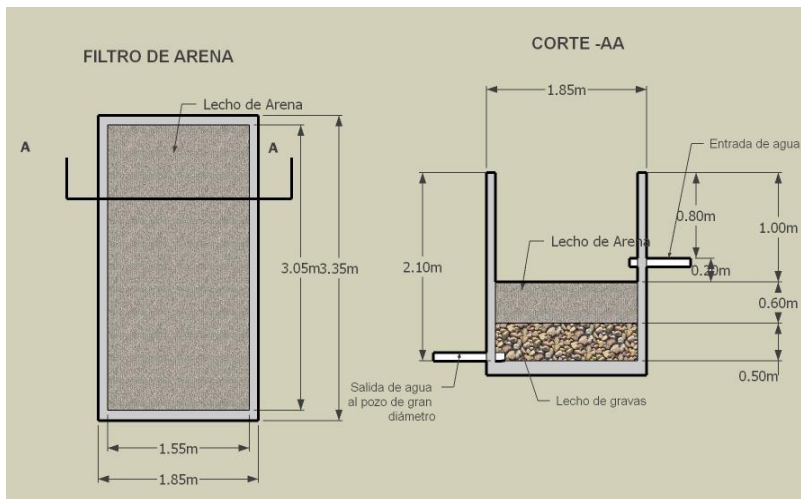
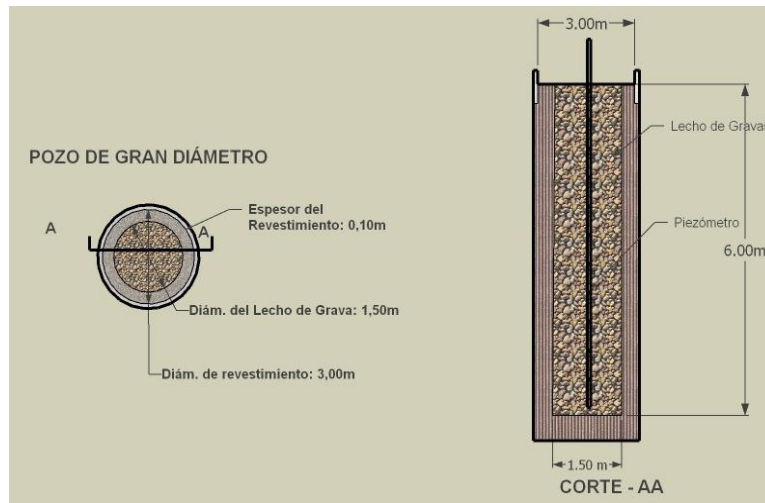


Figura 21. Planos y fotografía del Pozo de gran diámetro.

- Trinchera de infiltración 2: consta de una tubería ranurada, en forma de T, un tubo ranurado como piezómetro como se muestra en la figura 22.

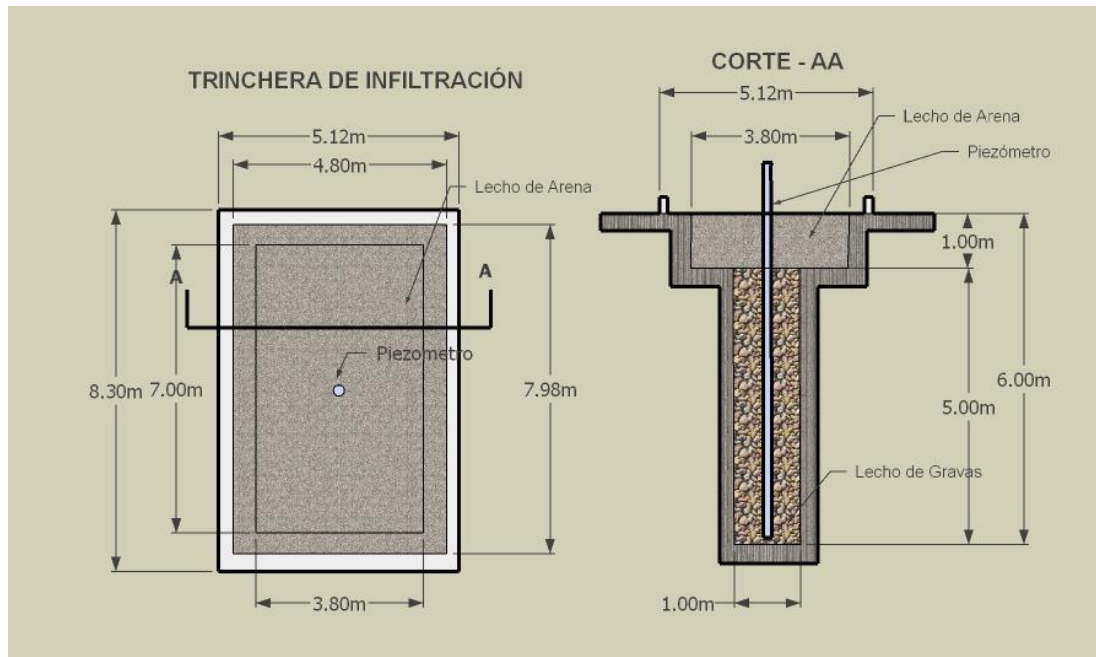


Figura 22 .Planos de la trinchera de infiltración 2

7 RESULTADOS

7.1 Eficiencia obras de recarga artificial

A continuación, podemos observar el resultado de la eficiencia de las obras de recarga artificial desde el año 2008 hasta el año 2018, con excepción del año 2014, por mantenimiento de éstas, tanto para la velocidad de infiltración (figura 23), como para el caudal infiltrado (figura 24) por cada una de las obras piloto de recarga artificial.

Cabe recordar que el análisis de la eficiencia de las obras piloto de recarga artificial se hizo con base en eventos de precipitación en los cuales entró agua a todas las obras de manera simultánea, agua en todo el sistema, con excepción de la trinchera 2, en la que el agua almacenada es resultado de excesos en el sistema, como se explicó en la metodología y en el funcionamiento de las obras.

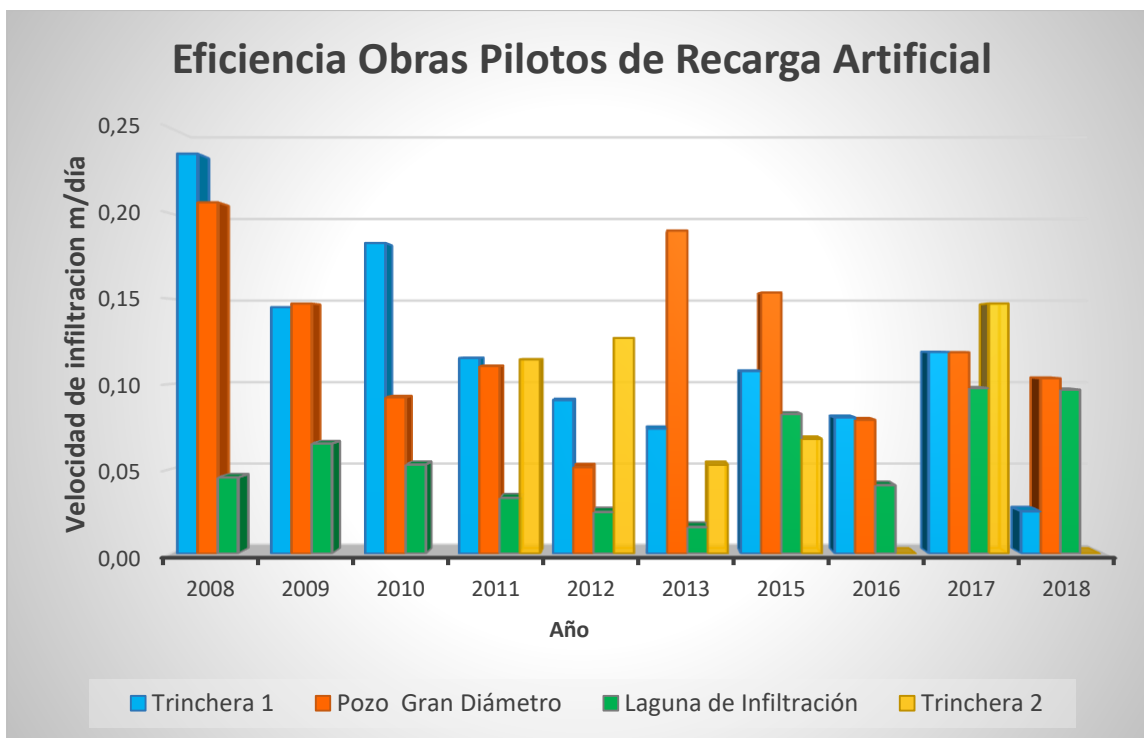


Figura 23. Eficiencia obras piloto de recarga artificial, velocidad de infiltración

En la velocidad de infiltración, figura (19), se puede observar que no hay una tendencia marcada en relación a los años. Se evidencia que desde el año 2008 hasta el año 2010, las obras que presentan mayor velocidad de infiltración son la trinchera 1 y el pozo de gran diámetro, en ese orden, con velocidades mayores de 0.24 m/día y 0.21 m/día respectivamente. Además, la obra que presenta menor velocidad de infiltración es la laguna, con una velocidad máxima de 0.07 m/día para el año 2009.

Desde el año 2011 en adelante, a excepción del año 2014 (mantenimiento obras), se tienen datos de la trinchera 2 construida posteriormente y se evidencia que, al igual que la trinchera 1, ésta presenta una velocidad alta de infiltración, en relación con las demás obras. Dos años atípicos en esta relación ya mencionada son el 2013 y el 2018; en el primero, la trinchera 1 disminuye significativamente su velocidad de infiltración a 0.07 m/día y el pozo de gran diámetro la aumenta, llegando hasta 0.19 m/día. Para el año 2018 ocurre algo similar, la trinchera 1 disminuye la velocidad de infiltración a 0.03 m/día, mientras que la laguna de infiltración y el pozo de gran diámetro tienen una velocidad de infiltración de 0.10 m/día.

Estas variaciones tienen una relación directa con los datos tomados en las obras en estos dos años. En el año 2013, CARSUCRE reporta daños en la trinchera de infiltración, razón por la cual en esta obra de recarga solo se reportó la medición del mes de mayo, mientras que en las demás obras de recarga artificial se reportaron datos de siete meses. Algo similar ocurre con el año 2018, donde solo se tiene reporte de un solo evento de precipitación, en el cual se tuvo agua en todo el sistema de obras, lo que aumentaría la incertidumbre de los datos al momento de realizar el análisis.

En los años 2016 y 2018 notamos que no se encuentran datos relacionados a la velocidad de infiltración en la trinchera 2, esto se debe a que a esta obra solo llega una columna de agua cuando hay excesos dentro del sistema, como ya se explicó en el funcionamiento de las obras piloto de recarga artificial.

Analizando la eficiencia de los caudales infiltrados por las obras piloto de recarga artificial (figura 20) se puede notar que hay una tendencia marcada a lo largo de los años. La laguna de infiltración es la obra que mayores caudales de infiltración aporta comparándola con las demás obras en el sistema piloto implementado en el acuífero Morroa, con caudales que van desde 47.1 m³/año hasta 165.44 m³/año.

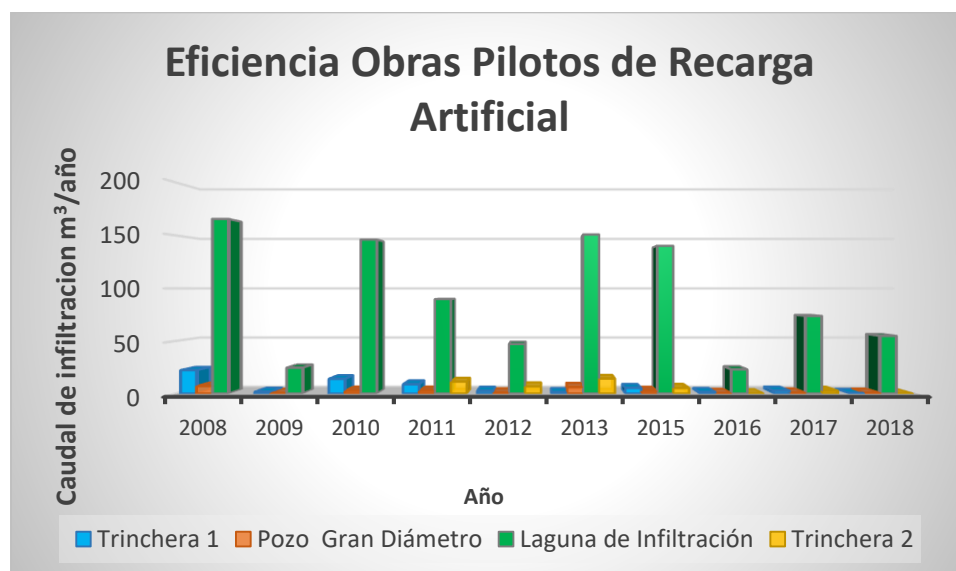


Figura 24. Eficiencia obras piloto de recarga artificial, caudal de infiltración.

7.2 Caudal total infiltrado por las obras de recarga artificial

Los caudales totales infiltrados se obtuvieron con la metodología descrita en el numeral 2.2.2. Esta consiste en calcular volúmenes de agua infiltrada en un tiempo determinado en cada obra y es el resultado de un proceso en el cual intervienen factores como el área de almacenamiento de la obra, la columna de agua medida con base a los niveles piezométricos tomados de manera manual y el tiempo que demora esa columna en infiltrarse (ver anexo 2). Cabe resaltar que para obtener el caudal total infiltrado se tuvieron en cuenta todos los eventos de precipitación registrados en cada año.

7.2.1 Laguna de infiltración

Se puede observar en la figura 25, la laguna de infiltración presentó los mayores caudales infiltrados en los años 2010 y 2011, con valores de 622.04 m³/año, 344.25 m³/año, respectivamente y el año con menor caudal es el 2017 con valor de 51.60 m³/año, como se puede observar en la tabla 7. Cabe recordar que en todos los análisis realizados el año 2014 se encuentra ausente por mantenimiento en las obras piloto de recarga artificial.

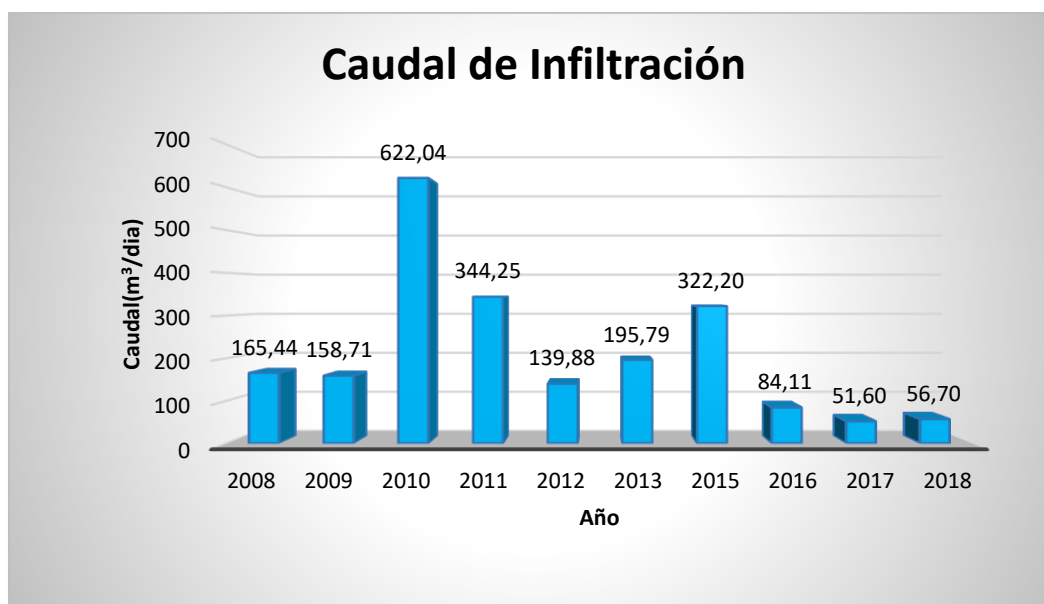


Figura 25. Caudal total acumulado de infiltración para los años analizados, en la laguna de infiltración.

7.2.2 Pozo de gran diámetro y trincheras de infiltración

En la figura 26, se observa los resultados de los caudales acumulados totales para las obras: pozo de gran diámetro y las trincheras de infiltración 1 y 2.

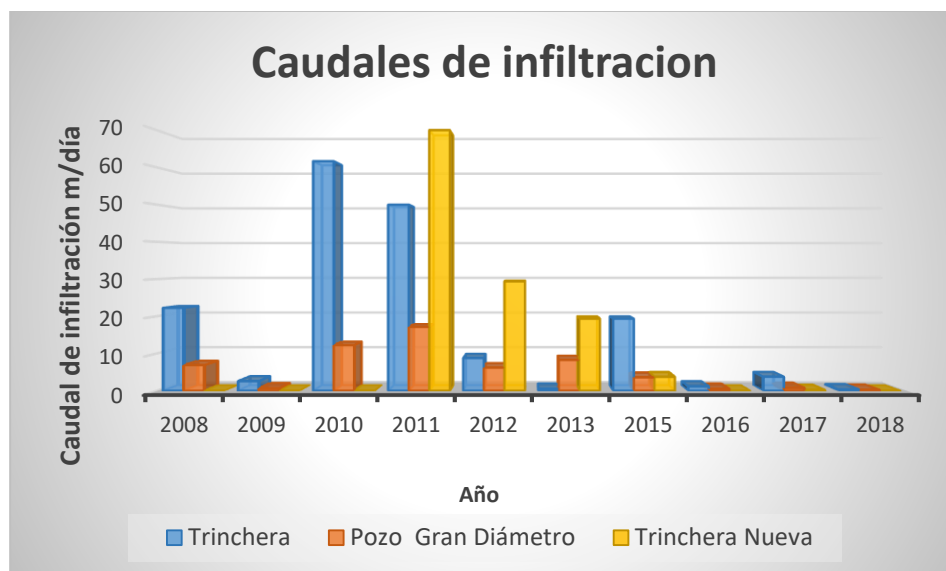


Figura 26 .Caudal total acumulado de infiltración para los años analizados, en el pozo de gran diámetro y las trincheras de infiltración 1 y 2.

El pozo de gran diámetro presentó caudales de infiltración que oscilan entre 0.24 m³/año y 17.16 m³/año, la trinchera de infiltración 1 valores que van desde 0.36 m³/año hasta 61.65 m³/año y la trinchera 2 resultados que parten de 0 m³/año, en años donde no se registraron datos de volumen de agua en esta obra y 69.99 m³/año como valor máximo (Tabla 9). Al igual que la laguna de infiltración, los años de mayor y menor registro de caudales en las obras piloto de recarga artificial, están asociados directamente con años húmedos y años secos, relación que se analizará en más detalle posteriormente en la discusión del trabajo.

Tabla 9. Caudales totales infiltrados por el pozo de gran diámetro en el periodo 2008-2018.

Obra	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2015	2016	2017	2018	Σ caudales acumulados m³/año
Pozo gran diámetro	6.9	0.68	12.26	17.16	6.23	8.29	3.63	0.52	0.76	0.24	56.67
Trincheras 1	22.26	2.59	61.65	49.96	8.82	0.55	19.36	1.17	3.77	0.36	170.49
Trincheras 2	0.00	0.00	0.00	69.99	29.36	19.36	3.76	0.00	0.21	0.00	227.16

7.3 Precipitación

En la figura 27 se puede observar la precipitación promedio multianual calculada en base a los datos de la estación El Tesoro, para los años analizados. La precipitación media anual es de 1164.3 mm/año y se logran distinguir dos épocas distintas, una época seca de diciembre a marzo y otra lluviosa de mayo a octubre, con un pequeño verano entre junio y julio, asociado al ENSO.

Cabe resaltar que el comportamiento de las precipitaciones de manera anual se analizará junto con la evapotranspiración y los caudales infiltrados por las obras en la discusión del trabajo.

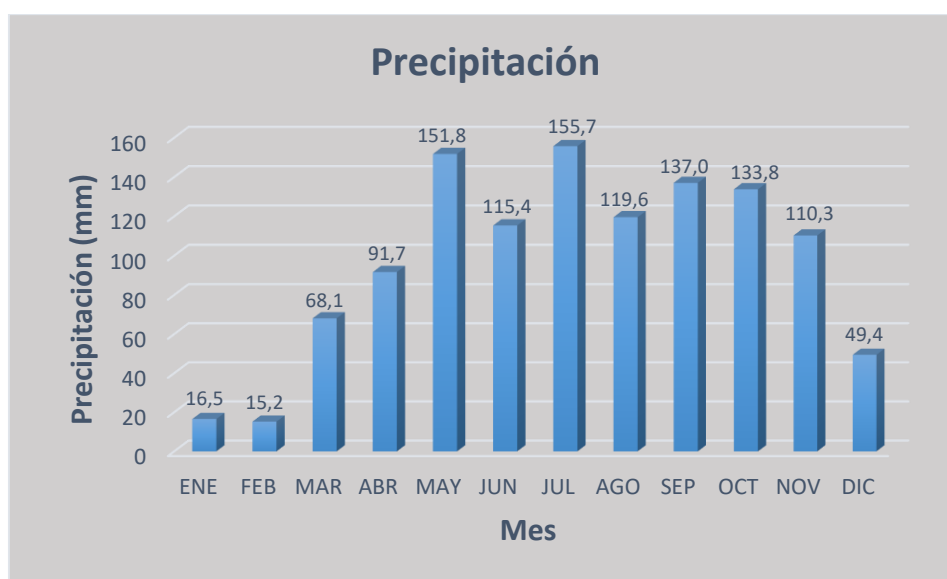


Figura 27. Precipitación promedio multianual para los años 2008-2018. Elaboración propia.

7.4 Evapotranspiración

7.4.1 Evapotranspiración potencial (ETP)

Como se explicó en el numeral 2.2.4.1 (metodología), la evapotranspiración potencial fue calculada por el método de Thornthwaite. Este se basa principalmente en la medida de la temperatura media para cada mes estudiado, con ella se calcula un índice de calor mensual y, a su vez, el índice de calor anual para cada año analizado, obteniendo así la ETP sin corregir. Luego, con los factores de corrección, se determina la ETP corregida para cada uno de los meses. Este proceso se realizó

con base en las fórmulas de EVP propuestas por Thornthwaite, como se puede observar en el anexo 4.



Figura 28. Evapotranspiración potencial (ETP) promedio multianual para los años 2008-2018.
Elaboración propia.

En la figura 28, podemos apreciar que los meses en los cuales la evapotranspiración potencial es mayor son marzo, mayo y julio con valores de 181.17 mm/mes, 178.72 mm/mes y 177.34 mm/mes, respectivamente y aquellos meses en los cuales se presentan valores menores corresponde a los meses octubre y noviembre con valores de 145.57 mm/mes y 141.85 mm/mes. La evapotranspiración potencial media anual es de 1978.02 mm/año.

7.4.2 Evapotranspiración real (ETR)

La evapotranspiración real (ETR) se calculó por medio del método de Budyko, el cual consiste en una relación de las variables la precipitación media mensual y la ETP mensual, proceso que se llevó a cabo con base a las fórmulas de ETR propuestas por Budyko, como se puede observar en el anexo 4.

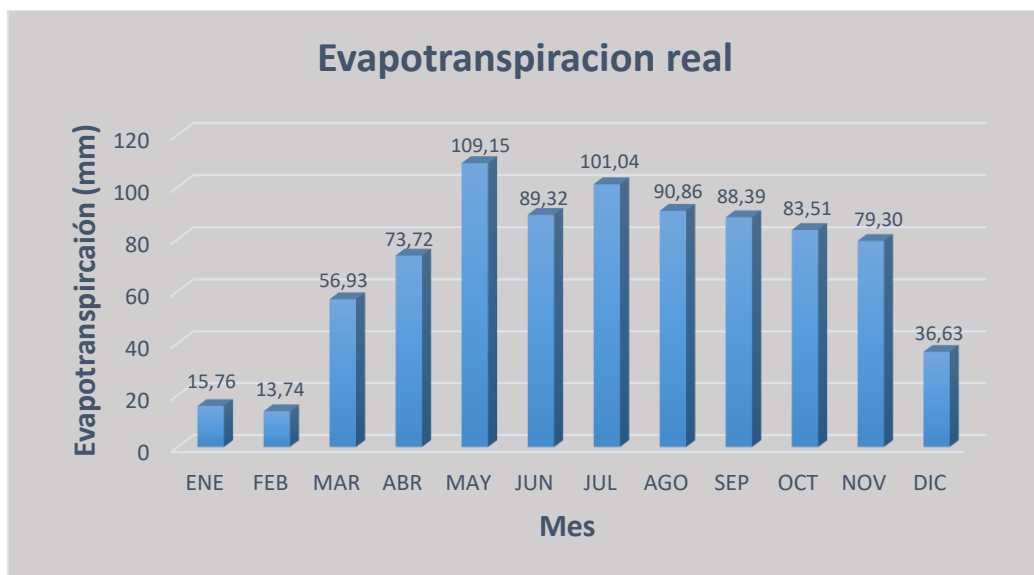


Figura 29. Evapotranspiración real (ETR) promedio multianual para los años 2008-2018. Elaboración propia.

La evapotranspiración real media anual es de 838.37 mm/año. En la figura 29 se logran ver dos tendencias, una de mayo a noviembre donde se observan los mayores rangos, con valores que oscilan entre 79.30 mm/mes y 109.15 mm/mes y otra tendencia menor que va desde el mes de diciembre hasta el mes de abril, con valores que van desde 13.74 mm/mes hasta 73.72 mm/mes.

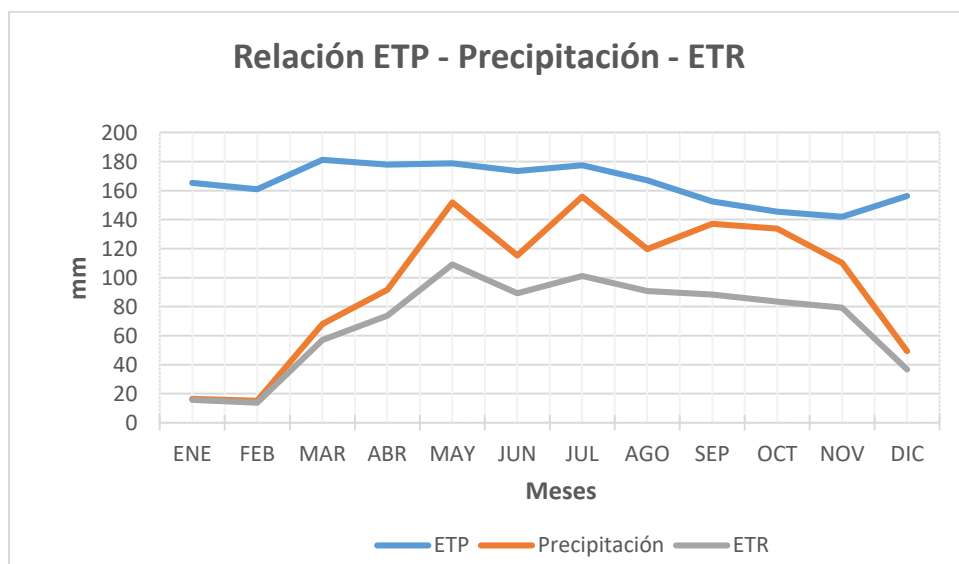


Figura 30. Relación entre la evapotranspiración potencial (ETP), evapotranspiración real (ETR) y la precipitación promedios multianuales para los años 2008-2018. Elaboración propia.

Realizando un análisis de los promedios mensuales multianuales entre la evapotranspiración potencial (ETP), la precipitación y la evapotranspiración real (ETR) (figura 30), podemos observar que la ETP siempre está por encima de las otras dos variables, dado que es el valor máximo que se podría evapotranspirar en la zona de estudio.

Al analizar de manera separada la ETP y la precipitación, podemos ver que esta excede los niveles de precipitación en un 169.9% (tabla 8). También se observa una tendencia en el periodo de tiempo que va desde mayo a agosto: se identifica una relación marcada entre las dos variables antes mencionadas, al aumentar la disponibilidad del recurso, aumenta el potencial de evapotranspiración y al disminuir disminuye la ETP, sin mantener una relación de magnitud constante en las dos variables. Algo similar ocurre en los meses de enero y febrero.

Esta tendencia no se observa en el resto de los meses, donde se puede apreciar que no hay una correlación entre las dos variables. En meses como noviembre y diciembre observamos que, al disminuir la precipitación, se presenta un aumento de la ETP; al igual que en el mes de marzo, donde la ETP alcanza su valor más elevado.

Algo distinto pasa con la relación entre la precipitación y la ETR. En los meses de enero y febrero, donde las precipitaciones son muy bajas, se comportan de manera similar, y en los meses restantes se observa una tendencia recíproca entre ambas variables: si hay mayor precipitación, hay mayor ETR, de igual forma en el caso contrario. Finalmente se tiene que la ETR promedio multianual es el 72% de la precipitación (tabla 10).

Tabla 10. Caudales totales infiltrados por el pozo de gran diámetro en el periodo 2008-2018.

Flujo	Promedio multianual (mm/año)	Porcentaje (%)
Precipitación (P)	1164.33	
Evapotranspiración potencial (ETP)	1978.02	169.9
Evapotranspiración real (ETR)	838.37	72.0

7.5 Piezómetros

Dentro del el predio El Tesoro, CARSUCRE tiene ubicados de manera estratégica dos piezómetros, 44-IV-D-PZ-02 y 44-IV-D-PZ-04 ubicados a 400 m y 10 m de las obras piloto de recarga artificial respectivamente. Al analizar la variación temporal desde el año 2008 hasta el año 2018 de los niveles estáticos de estos piezómetros, figura 31 y 32, se puede observar que los niveles piezométricos del acuífero de Morroa a lo largo del periodo analizado han descendido 103 m para el piezómetro 02 y 86 m para el piezómetro 04. Sin embargo, al analizar el comportamiento de cada uno de estos piezómetros, se pueden observar periodos de tiempo en los cuales los descensos se han mitigado e incluso contrarrestado; para el piezómetro 02 (figura 31), estos periodos de tiempo van desde agosto de 2010 hasta julio de 2012, octubre de 2016 a marzo de 2013 y octubre de 2014.

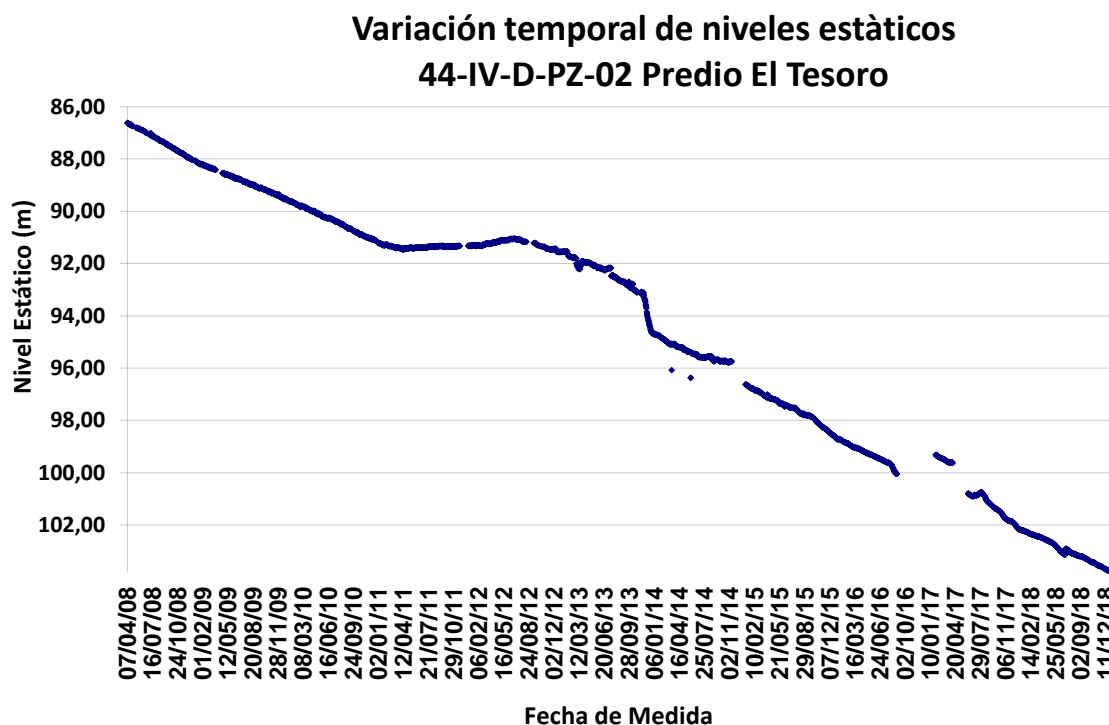


Figura 31. Variación temporal de niveles estáticos del piezómetro 44-IV-D-PZ-02 Predio El Tesoro.

Para el piezómetro 04 (figura 32), se observa un cambio en la tendencia de la curva en octubre de 2010; de ahí en adelante los periodos de tiempo donde se producen

cambios en la tendencia son: junio a diciembre de 2011, agosto de 2012, agosto a noviembre de 2013, septiembre a diciembre de 2014 y noviembre de 2016.

Si se analiza la ubicación espacial que tienen los piezómetros, las tendencias en la curva de los descensos, el número de eventos que mitigan o contrarrestan esos descensos, se puede notar que el piezómetro 04, el cual está ubicado más cerca de las obras de recarga artificial muestra menores descensos estáticos a lo largo del tiempo y mayores eventos o picos en la curva de tendencia, lo que indica que al estar más cerca de las obras, es más susceptible a los procesos que ocurren en dichas obras, este análisis es de suma importancia, ya que da un indicio, de la importancia que tienen las obras en la mitigación de estos niveles piezométricos en estos niveles del acuífero, y la relación directa que existe entre los niveles piezométricos, los caudales infiltrados y picos altos de precipitación, lo cual se analizara en la discusión.

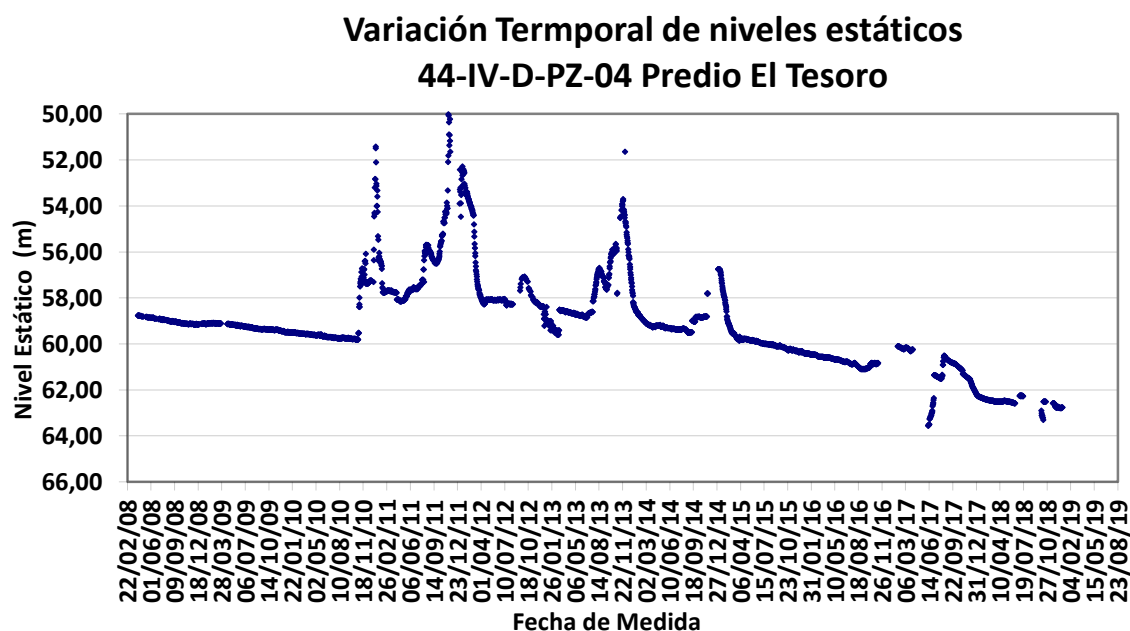


Figura 32 .Variación temporal de niveles estáticos del piezómetro 44-IV-D-PZ-04 Predio El Tesoro.

8 DISCUSIÓN

Custodio (1986) define la recarga artificial de acuíferos como el conjunto de técnicas que permiten aumentar la disponibilidad de aguas subterráneas, con la calidad necesaria a los usos que se destina, mediante una intervención consciente, directa o indirecta, en el ciclo natural del agua. Partiendo de esta definición, y recordando el objetivo de este trabajo el cual es analizar el comportamiento de las obras piloto de recarga artificial como alternativa a los descensos piezométricos del acuífero y al impacto de la evapotranspiración en la zona de estudio, en esta sección se discute la relación existente entre la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración, la eficiencia de las obras y los caudales infiltrados por estas obras a escala anual, con el fin de demostrar o negar que las obras piloto de recarga artificial implementadas por CARSUCRE son una técnica viable al momento de minimizar los descensos piezométricos y los efectos de la evapotranspiración en el acuífero Morroa.

La precipitación es la principal variable al momento de realizar recarga artificial. Analizando el comportamiento de esta en periodos anuales (figura 33) observamos que existen años por encima de la media (1164.3 mm) y por debajo de esta, definiendo así años húmedos, años secos y años normales. Con base en la diferencia existente de cada valor anual con el valor de la precipitación media, valores que excedieran 500 mm de la media anual fueron considerados años húmedos o secos, dependiendo si la diferencia es positiva o negativa. Los años 2010 y 2011, por ejemplo, son definidos como años húmedos con valores de precipitación de 1794.8 mm y 1730.9 mm. Por su parte, el año 2016 es considerado un año seco, con valores de 580.6 mm; el resto de los años se consideran años normales.

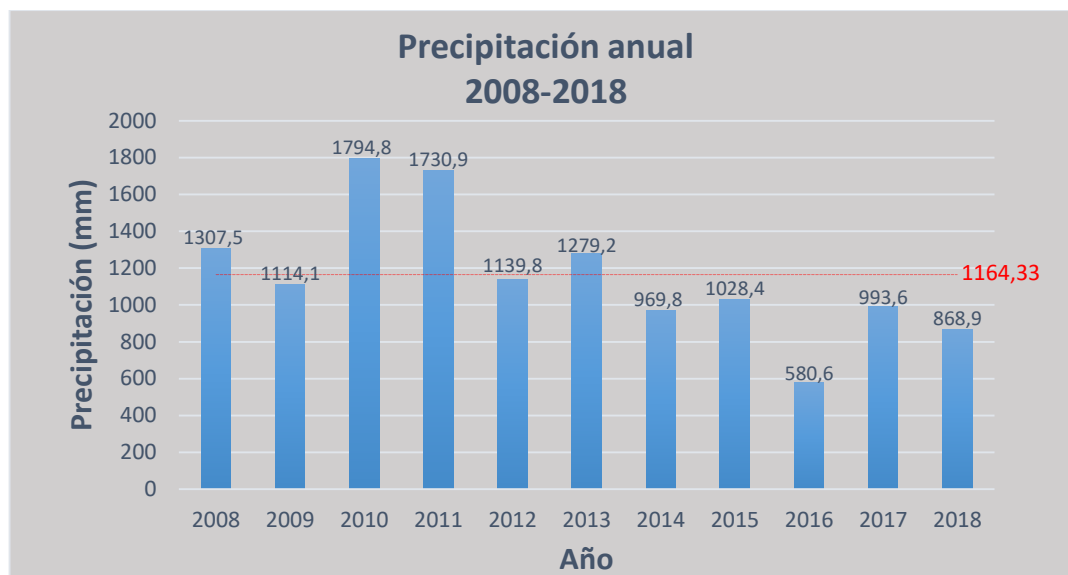


Figura 33. Comportamiento de la precipitación anual para el periodo de tiempo 2008-2018.
Elaboración propia.

La evapotranspiración es la combinación de dos fenómenos, evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. Penman (1948) y Thornthwaite (1948) introducen un nuevo concepto, la evapotranspiración potencial (ETP), la cual es definida como la tasa máxima de evaporación y transpiración presentada en un intervalo de tiempo dado bajo condiciones óptimas de desarrollo vegetal y capacidad de campo permanentemente completa. Según estos autores, la ETP depende únicamente de variables climatológicas del lugar de estimación durante el periodo analizado y es el valor máximo que puede alcanzar dicha variable en un tiempo determinado.

Tradicionalmente, la clasificación de zonas áridas, semiáridas y húmedas se basaba sólo en la precipitación anual media (Lloyd, 1986). Actualmente, dicha clasificación se basa en la relación entre la precipitación y la evaporación. Las zonas áridas y semiáridas se caracterizan por tener una razón entre la precipitación media anual y la evapotranspiración potencial inferior a 0.65 (UNEP, 1997) y por tener una ETP con valores mayores a la precipitación (Thornthwaite, 1948). En la zona de estudio la razón entre estas dos variables es de 0.05 y, si observamos la figura 34, podemos ver como la ETP supera la precipitación, con excepción de los años 2010 y 2011, donde la precipitación alcanza y supera los valores de la ETP. Esta particularidad

se debe a los niveles de precipitación que se alcanzan en estos dos años húmedos, al haber un aumento de esta variable, las temperaturas medias disminuyen lo que hace que el calor sensible del aire transfiera menos energía, lo que implica una menor capacidad de evapotranspiración total (Allen et al, 2006).

Allen (2006) define la evapotranspiración real como la cantidad de agua que podría evapotranspirarse en relación a la disponibilidad de agua. Al analizar el comportamiento de esta variable (figura 35) vemos que la relación que mantiene en todo el periodo con la evapotranspiración potencial es negativa ($ETR \leq ETP$), como pasa de manera mensual (figura 28). Este es un comportamiento normal para zonas áridas y semiáridas según el balance de vapor de agua, definido por Thornthwaite (1948). En cuanto a la relación que existe entre esta variable y la precipitación, vemos que sigue una tendencia similar, básicamente por la disponibilidad de agua que existe en cada año para evapotranspirar: a mayor disponibilidad de agua mayor es la ETR y cuando se agota la reserva de agua, la ETR tiende a coincidir con las precipitaciones. Esto se puede observar en la figura 30, en el año 2016, definido anteriormente como un año seco.

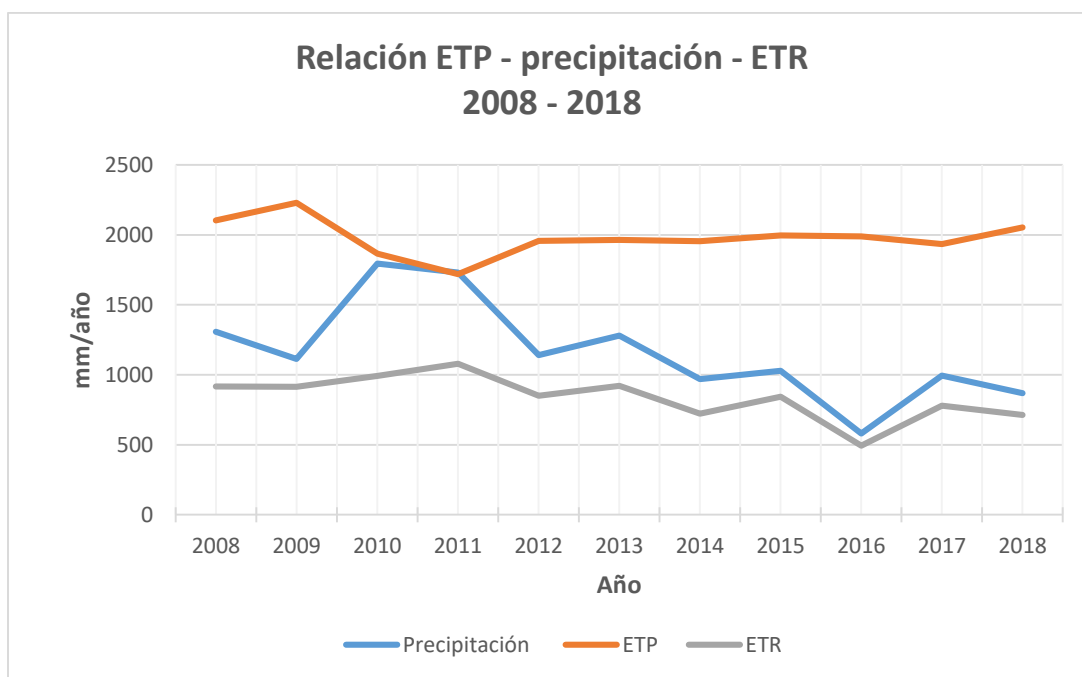


Figura 34. Relación entre la evapotranspiración potencial (ETP), evapotranspiración real (ETR) y la precipitación acumulativa anual para los años 2008-2018. Elaboración propia.

Forero (2000), define la infiltración como una propiedad hidrodinámica, que considera el movimiento vertical del agua en el suelo, estrechamente relacionada con los procesos de capilaridad y de las fuerzas asociadas con la adhesión y la cohesión de las partículas del suelo. Esta infiltración depende de las características propias del medio, como el contenido de materia orgánica, la porosidad, la textura, la densidad aparente y el contenido de agua, entre otros (Chowdary et al. 2006; Rodríguez-Vásquez et al. 2008).

En zonas áridas y semiáridas, encontramos características propias del terreno que determinan el comportamiento de la infiltración: la aridez aumenta el espesor de la zona no saturada y disminuye la materia orgánica y los agregados del suelo, lo que aumenta la presencia de rocas en superficie y puede llegar a formar costras biológicas superficiales que reduce significativamente las tasas de infiltración (Yair, 1990; Solé-Benet et al., 1997). También se puede formar un horizonte cálcico por acumulación de carbonato que, en algunos casos, puede llegar a formar una costra de muy baja permeabilidad (Gile, 1961). Estas características, junto con factores antrópicos, son determinantes para la infiltración en el área de estudio, lo que se refleja en la capacidad potencial de recarga del acuífero Morroa, que es una de las problemáticas expuestas en este trabajo y por las que se diseñaron y ejecutaron las obras piloto de recarga artificial.

El balance hídrico es una herramienta que permite conocer características propias de una cuenca o zona específica. Éste se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de la continuidad, la cual establece que para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier periodo de tiempo la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada. En general, esta técnica implica mediciones de ambos aspectos: almacenamientos y flujos de agua; sin embargo, algunas mediciones se eliminan en función del volumen y el periodo de tiempo utilizado para el cálculo (UNESCO, 1971). Para realizar el balance hídrico en la zona de estudio, se tuvieron en cuenta la precipitación, evapotranspiración real y la escorrentía. Cabe destacar que esta última variable no fue objeto de trabajo en el presente informe

debido a que el análisis realizado se hizo de manera puntual en las obras piloto de recarga artificial; sin embargo, para hacer de este balance algo más completo, se tuvo en cuenta el dato de escorrentía obtenido por Arias y Barrientos, 2004. Estos autores, en el trabajo titulado 'Diseño de las obras de recarga artificial para el acuífero de Morroa', el cual fue de gran importancia a la hora de llevar a cabo la construcción de las obras piloto de recarga artificial, calcularon la escorrentía aplicando el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS). Este método engloba aspectos como usos y tipos de suelo, condiciones hidrológicas para la infiltración y condiciones previas de humedad. Los autores mencionados obtuvieron como resultado que la escorrentía superficial corresponde al 8.8% del valor total de la precipitación media anual. Llevando esta relación a los valores de precipitación media anual calculados en el presente trabajo, obtenemos que el valor de la escorrentía es de 102.46 mm/año.

Aplicando los resultados antes mencionados en la ecuación del balance hídrico:

$$P = E_s + ETR + In$$

Donde:

P : Precipitación

E_s : Escorrentía

ETR : Evapotranspiración real

In : Infiltración

Se obtuvo como resultado que el valor de la infiltración en el área de estudio es de 223.50 mm/año (ver anexo 6).

De manera mensual, los valores de infiltración presentados por cada una de las obras de recarga artificial muestran una relación directa con la precipitación. En la figura 35 podemos ver los caudales totales infiltrados por cada año analizado en las obras piloto de recarga artificial y su relación con variables como la precipitación y la evapotranspiración real. Cabe destacar que esta comparación no se hace en relación a las magnitudes, sino que solo se mirará la relación existente en cuanto a la tendencia de las variables.

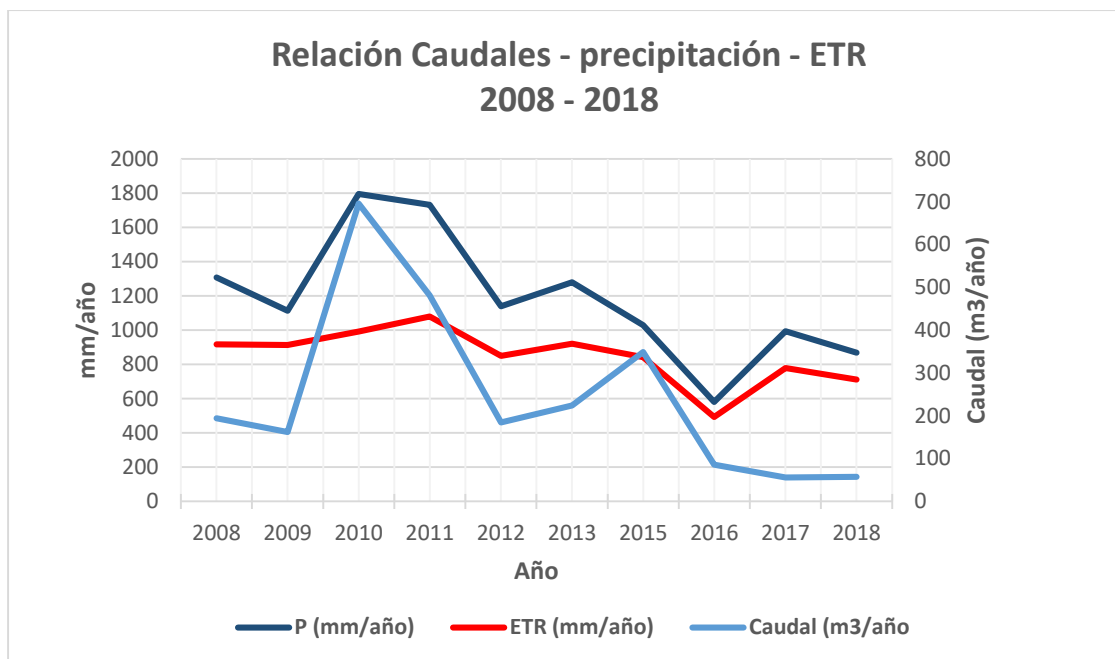


Figura 35. Relación entre la evapotranspiración real (ETR), la precipitación (P) y los caudales infiltrados totales para los años 2008-2018. Elaboración propia.

En términos generales, vemos que existe una relación entre la precipitación y los caudales infiltrados: un aumento de la precipitación se refleja directamente en los caudales que fueron infiltrados en el periodo de tiempo analizado. Sin embargo, hay puntos dentro de la tendencia de los caudales con características propias. Por ejemplo, en el año 2010, el caudal alcanza su pico máximo (695.95 m³/año) como también lo hace la precipitación (1794.80 mm/año); a medida que disminuye la carga de agua, disminuye el flujo en la zona no saturada, lo que implica a su vez una menor infiltración.

En el año 2015 ocurre algo particular con los caudales de infiltración: la precipitación en este año sigue una trayectoria de disminución, pero el caudal de manera particular aumenta. Si recordamos la metodología de trabajo y los resultados nos damos cuenta de que el año 2014 es un año en el cual no se registran datos de infiltración de caudales, pues las obras piloto de recarga artificial se encontraban en mantenimiento y esta es la razón por la que se puede explicar el aumento del caudal infiltrado en el año 2015, pues el mantenimiento en las obras piloto de recarga artificial significa remoción de sedimentos acumulados en cada una de las obras a lo largo de los años. Esta remoción de sedimentos está directamente asociada a la

disminución de la colmatación, la cual se define como un proceso que se caracteriza por la pérdida sostenida de la capacidad de conducción de agua por parte de un medio poroso permeable (disminución de la conductividad hidráulica saturada), la cual tiene diversos orígenes: físico, biológico y químico (Wilmans et al, 2001).

El año 2016, el cual fue definido como un año seco, se caracteriza por presentar un caudal de infiltración bajo; sin embargo, en los años siguientes (2017-2018) los caudales disminuyen aún más y no tienen relación alguna con la precipitación, la cual aumenta. Como ya se mencionó en la parte de resultados, en la eficiencia de las obras piloto de recarga artificial, en el año 2018 solo se tienen valores en un solo mes, algo similar ocurre en el año 2017 aunque este año tiene más registros de eventos de infiltración. Este hecho aumenta la incertidumbre de los datos y aunque muestra el caudal real tomado, no relaciona la capacidad total que hubieran tenido dichas obras si los funcionarios de CARSUCRE hubieran tomado datos de todos los eventos del año.

En cuanto a la relación del caudal infiltrado por las obras de recarga, la ETR y la P, concluimos nuevamente que la variable ETR está directamente relacionada con el aumento de la precipitación y el aumento de los caudales, lo que nos indica que de manera directa las obras de recarga artificial no minimizan los efectos negativos de la evapotranspiración.

La columna de agua total infiltrada por cada obra piloto de recarga se determinó teniendo en cuenta las medidas del nivel estático tomadas por funcionarios de CARSUCRE en cada obra y realizando operaciones dependiendo de las condiciones dadas al momento de tomar los datos (Metodología). En la figura 36, se observa la relación existente entre las columnas de agua de las variables precipitación, ETR y columna infiltrada por las obras piloto. Al realizar un análisis, vemos que los valores de la columna de agua infiltrada exceden en magnitud a las demás variables; esta relación, aunque parezca algo ilógica se puede explicar debido a que las columnas de agua que llegan a las obras de recarga artificial son provenientes de una cuenca y no de la precipitación puntual en el lugar de las obras de recarga.

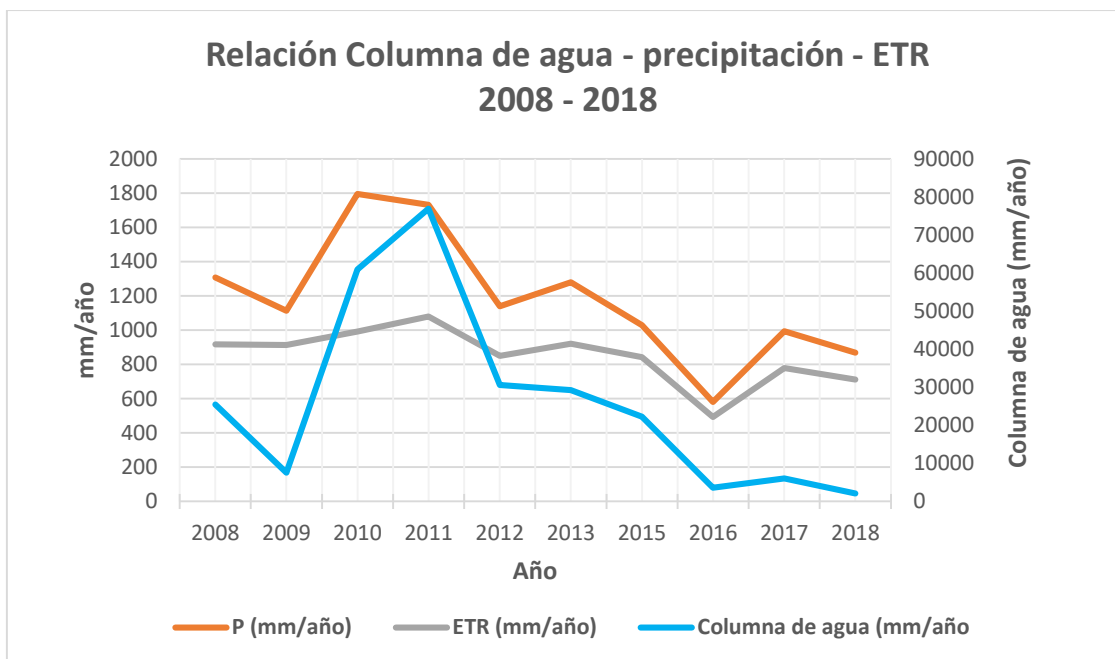


Figura 36. Relación entre la evapotranspiración real (ETR), la precipitación (P) y la columna de agua infiltrada por las obras de recarga artificial para los años 2008-2018. Elaboración propia.

Al comparar el valor de la infiltración hallado por la fórmula del balance hídrico (223.50 mm/año) y los valores de columna de agua infiltradas por las obras piloto de recarga artificial (26474.8 mm/año), vemos que estos presentan una gran diferencia en sus valores. Como se dijo anteriormente, los valores obtenidos por las obras de recarga artificial son el resultado de las sumatorias de aguas de una micro cuenca; sin embargo, podemos apreciar que son complementarios, que las obras recolectan y potencian láminas de agua infiltradas y que la complementación de estas dos variables puede ayudar a contrarrestar los valores de explotación en el acuífero Morroa.

Esta relación es visible al momento de analizar los descensos de los piezómetros 02 y 04 (figura 31, 32) en donde se visualiza la relación que hay entre estos descensos y los caudales infiltrados por las obras piloto de recarga artificial. Como se explicó anteriormente en los resultados, la ubicación espacial de los dos piezómetros es de suma importancia para visualizar los aportes positivos de la recarga artificial. Ambos piezómetros muestran periodos relacionados a las altas precipitaciones (años 2010 – 2011) donde lo descensos se minimizan; sin embargo,

el piezómetro 04, el cual se encuentra a tan solo 10 metros de las obras, muestra mayores cambios en la tasa de descenso en estos años húmedos. Esto indica que, si bien los eventos de precipitación asociados a estos años húmedos aportan caudales de infiltración, las obras piloto de recarga artificial implementadas en el predio El Tesoro potencian estos caudales de infiltración asociados a estos años húmedos analizados. Se demuestra así que la implementación de obras de este estilo a una mayor escala minimizaría los efectos adversos que tiene la sobreexplotación del acuífero y potenciaría la infiltración asociada a eventos de precipitación dados en la zona de estudio.

La recarga artificial de acuíferos no es una técnica nueva. Ésta se ha implementado desde la época romana, cuando aplicaron la técnica en Túnez con terrazas retenían el agua de escorrentía y facilitaban su infiltración (Pérez, 1995). A lo largo de los años han sido varios los trabajos de recarga artificial que se han implementado en zonas donde las condiciones climáticas afectan las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos y donde el agua subterránea es fuente importante de abastecimiento de ciudades enteras.

En Latinoamérica, México es un país en el cual en más de la mitad de su territorio predominan condiciones climáticas áridas y semiáridas, por lo que el agua subterránea constituye una fuente esencial para su desarrollo. En este país un proyecto piloto de recarga artificial de acuíferos fue llevado a cabo en la Comarca Lagunera de México Norte, una de las principales zonas agrícolas del país (UNESCO, 2005). El suministro de agua para riego es tomado de la descarga de los ríos Nazas y Aguanaval y de unas 3500 perforaciones subterráneas que extraen agua del acuífero Comarca Lagunera, extracción que es por lo menos tres veces mayor que la recarga. Este gran acuífero se ubica en los estados de Durango y Coahuila y cubre una superficie aproximada de 12,616.61 kilómetros. La zona presenta una temperatura media anual de 22°C con temperaturas máximas que alcanzan los 32°C, una precipitación media anual de 260 mm y una evapotranspiración potencial media anual de 2178 mm (Aparicio, 2018); condiciones que no son iguales pero que pueden ser comparadas a las del acuífero

Morroa y que nos muestran que, aunque no contamos con ríos en el departamento de Sucre que aporten caudales y que puedan ser utilizados en el sustento de agua del departamento, sí contamos con una cantidad de precipitación media anual que puede ser utilizada para la infiltración del acuífero por medio de obras de recarga artificial.

El plan piloto llevado a cabo en este acuífero Comarca Lagunera utilizó una cuenca arenosa como laguna de infiltración: el agua era conducida y llevada para ser infiltrada. Cabe destacar que esta agua no era resultado de la precipitación, sino que fue agua transportada de una represa de la zona llamada represa de Zarco. De esta obra piloto se concluyó que, del agua almacenada para infiltrar, aproximadamente el 4% es evapotranspirada y el 96% de esta es infiltrada, respuesta que se monitoreó en pozos de observación contruidos cerca del lugar de la infiltración. Sin embargo, los autores también concluyeron que la infiltración se redujo en un 5% debido a problemas de obstrucción. Estos datos nos dan una idea de las condiciones de evaporación e infiltración que podemos tener en la laguna de infiltración en el acuífero Morroa, teniendo en cuenta que las condiciones climatológicas y geológicas son distintas.

Kurki y otros (2013) estudiaron la recarga artificial de acuíferos en Finlandia, definiéndola como una técnica donde además de las condiciones climáticas e hidrogeológicas, intervienen factores de suma importancia como lo son los aspectos socioeconómicos. Estos autores aclaran que en el país nórdico y en Suecia, MAR (Managed Aquifer Recharge) es principalmente un método de tratamiento de agua. Según Kolehmainen (2008), el objetivo principal de MAR en regiones boreales es la eliminación de materia orgánica natural del agua, para luego ser infiltrada. Las altas concentraciones de materia orgánica natural es un problema clave en el tratamiento de aguas superficiales en Finlandia, por lo cual en este país se valora el agua subterránea más que el agua superficial como fuente de agua doméstica por la mejor calidad y por temperaturas estables. Esta situación no está muy alejada de la realidad colombiana, donde las fuentes superficiales cada día están más contaminadas y se hace más difícil el tratamiento de éstas, lo que de una u otra

manera está apuntando a la implementación de diferentes técnicas en el país para maximizar las reservas de agua subterránea.

En Islandia, el principal método de recarga artificial son las lagunas de infiltración, utilizadas desde la década del 70; sin embargo, al realizar este tipo de obras, se remueve la capa de suelo. Si recordamos al inicio de esta discusión, Yair (1990) y Solé-Benet y otros (1997) hablan de la importancia que tiene la materia orgánica y los agregados del suelo en zonas áridas y semiáridas. Para la recarga potencial de un acuífero este factor disminuye por la aridez y aumenta la presencia de rocas en superficie, algo que según los autores disminuye la capacidad de infiltración. Lo mencionado por Kurki (2013) nos hace un llamado a analizar si la remoción de esta capa al momento de realizar la construcción de una laguna de infiltración, la cual ya es bastante pobre en zonas áridas, afecta la capacidad de infiltración de dicha obra al realizar la recarga artificial.

Son muchos los trabajos que se han realizado sobre recarga artificial en diferentes países del mundo. Haciendo un resumen de las temáticas expuestas en los principales trabajos podemos definir que la gran mayoría fija su atención en la inyección de agua tratada a los acuíferos y muchos otros en la técnica Riverbank Filtration. Cabe recordar que la zona de estudio no presenta corrientes superficiales permanentes, sin embargo, en periodos lluviosos los principales arroyos de la zona aumentan de manera significativa su caudal, llevando consigo aguas residuales de los principales municipios y depositándolos en zonas importantes del acuífero. Con base en esta relación, se recomienda realizar estudios relacionados a la técnica Riverbank Filtration en esos arroyos intermitentes y, de esta forma, aumentar la disponibilidad de agua que se puede inyectar al acuífero.

9 CONCLUSIONES

- Los aumentos de los caudales de infiltración están directamente relacionados con el aumento de las precipitaciones y minimizan los descensos piezométricos de los niveles superiores del acuífero Morroa. Sin embargo, es

necesario implementar estas obras en una escala mayor para poder contrarrestar la sobre explotación.

- Con el análisis realizado no se encuentran indicios de que las obras piloto de recarga artificial minimicen los efectos de la evapotranspiración.
- Los valores de infiltración hallados en las obras piloto de recarga artificial son insignificantes comparados con el régimen de bombeo al que se encuentra sometido el acuífero Morroa; sin embargo, la evaluación de estos sistemas ofrecerá parámetros indispensables a la hora de diseñar obras de recarga a mayor escala.
- Los caudales de infiltración totales calculados con base en los datos de las obras de recarga artificial son mayores que el volumen calculado para la precipitación. Esto indica que las aguas que llegan a las obras de recarga no solo son el resultado de una precipitación puntual en el sitio donde están construidas las obras, sino que son aguas recogidas en una microcuenca.
- Ensayos de evaporación en la laguna de infiltración podrían dar una mejor estimación del porcentaje de agua que se evapora al ser almacenada en esta obra de recarga.
- La intensa explotación a la que se encuentra sometido el acuífero Morroa está ocasionando el agotamiento de las reservas. Las obras de recarga artificial a gran escala, de la mano con un uso adecuado uso del recurso y un mayor control pueden garantizar el abastecimiento futuro de la población en el departamento de Sucre.
- Aunque la recarga artificial podrá contribuir en la disminución de los descensos piezométricos, la sobreexplotación del acuífero Morroa sólo se disminuirá cuando se implementen acciones conjuntas e integrales que permitan un aprovechamiento sostenible del recurso hídrico.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio., 2011. Estudio Geo hidrológico del acuífero principal de la comarca lagunera, estados Durango y Coahuila.
- Arias A.M. Barrientos, A. E, 2004.Diseño de las obras de recarga artificial para el acuífero de Morroa. Trabajo de grado, Universidad de Sucre.
- Barco, O.J., Cuartas, L.A.,1998. *Estimación de la Evaporación en Colombia*. Trabajo dirigido de grado. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Budycó, M. J.,1974. *Climate and life*. Academic Press. N.Y., 508 p.
- CARSUCRE, 2005.Proyecto de protección integral de aguas subterráneas, PPIAS.Acuífero de Morroa. Sector Sincelejo Corozal-Morroa. Sincelejo
- CARSUCRE,2001. Sistema de Información para la Gestión del Recurso hídrico en el acuífero de Morroa (SIGAS).
- Chaves, B., Jaramillo, A.,1998. *Regionalización de la temperatura del aire en Colombia*. Cenicafé.
- Chowdary, V.M., Damodhara rao, M., Jaiswal, C.S., 2006. Study of infiltration process under differ ltration process under different experimental conditions. *Agr. Water Management*. 83(1-2):69-78.
- Delgadillo., 2013. Recarga artificial del acuífero como parte de la gestión integral de los recursos hídricos en el valle de México.
- Diamond, J.; Shanley, T., 2003. Infiltration rate assessment of some major soils. *Irish Geography*. 36(1):32-46.
- Fernández Gálvez, J., 2003. Dinámica del agua en suelos con gravas. Monográfica, Biblioteca de Ciencias Experimentales y Exactas. Editorial Universidad de Granada. Granada, España.190 p.
- FINAGUAS, 2000. Sistema de Información para la Gestión del Acuífero de Morroa. Sincelejo.
- Forero, J.A.,2000. Parámetros Hidrodinámicos para Riego. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Unidad de Publicaciones. 31p.
- Gile, L. H., 1961.A classification of horizons in the soil of a desert region, Doña Ana County, New Mexico. *Soil Science Society of America Proceedings*, 25, 52-61.

- Herrera, H.,1994. Vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero de Morroa. V Foro Institucional sobre el Agua Subterránea. ACOAGUA, Santafé de Bogotá.
- INGEOMINAS, 1992. Evaluación Hidrogeológica del Acuífero de Morroa.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2010. Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá D.C. 420 p.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2015. Estudio Nacional del Agua 2014. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C. 496 p.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales,2013. Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. Bogotá D.C. 47 p.
- Jensen, M.E.; Burman, R.D. y Allen, R.G. Eds,2060: Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. Manuals and Reports on Engineering Practice, N° 70, Committee on Irrigation Water Requirements of the Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers, ASCE. New York.
- Lin, M., Biswas, A., Bennett, E. M., 2019. Spatio-temporal dynamics of groundwater storage changes in the Yellow River Basin. Journal of environmental management, 235, 84-95.
- Rodríguez, A.F., Aristizábal, A.M., Camacho, J.H., 2008. Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiaikov en un suelo Ándico. Eng. Agric. 28(1):64-75.
- Rodríguez, C., Vargas, N., Jaramillo, O., Piñeros, A., Cañas, H., 2014. Capítulo 3. Oferta y uso de agua subterránea en Colombia. IDEAM, Estudio Nacional del Agua.
- Solé-Benet, A., Calvo, A., cerda, A., Lázaro, R., Pini, R., Barbero, J., 1997. Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain). Catena, 31, 23-38
- UNESCO, 2005 Estrategias para la gestión de recarga de acuíferos (GRA).

- Vargas, N., Campillo, A., García, M., Jaramillo, O., 2013. Aguas Subterráneas en Colombia: una Visión General. Ideam, 83-189.
- Yair, A., 1990. Runoff generation in a sandy area, the Nizzana sands western Negev, Israel. Earth Surface Processes and Landforms, 15, 597-609.